



TITLE:

極限地震入力を受ける免震建物の
積層ゴム破壊時における終局挙動
の解明(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

高岡, 栄治

CITATION:

高岡, 栄治. 極限地震入力を受ける免震建物の積層ゴム破壊時における
終局挙動の解明. 京都大学, 2009, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2009-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12330>

RIGHT:

極限地震入力を受ける免震建物の
積層ゴム破壊時における終局挙動の解明

2008 年 12 月

高 岡 栄 治

極限地震入力を受ける免震建物の 積層ゴム破壊時における終局挙動の解明

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 論文の構成	4
第1章参考文献	6
発表論文リスト	9
第2章 積層ゴムで支持した塔状免震建物の振動台実験	13
2.1 はじめに	13
2.2 実験要因と実験ケース	14
2.3 試験体	14
2.3.1 試験体概要	14
2.3.2 上部構造	15
2.3.3 積層ゴム	15
2.4 実験方法	25
2.4.1 加振方法	25
2.4.2 測定方法	26
2.5 実験結果	28
2.5.1 データ整理方針	28
2.5.2 入力波の再現性	28
2.5.3 応答最大値	29
2.5.4 積層ゴム破壊時加振レベルと破壊形式	32
2.5.5 大入力時の運動パターン	33
2.5.6 大入力時の運動パターンを支配する要因	38
2.5.7 大入力時の積層ゴムの挙動	42
2.5.8 積層ゴム破壊時の詳細挙動	46
2.5.9 引張り変形時の詳細挙動	62
2.5.10 終局加振レベルの評価	64

2.6 まとめ	66
第2章参考文献	68
第3章 圧縮荷重を受ける積層ゴムの大変形挙動を表す力学モデル	71
3.1 はじめに	71
3.2 修正マクロモデル	72
3.2.1 モデルの概要	72
3.2.2 モデルの構成式	74
3.3 ばね特性	77
3.3.1 回転ばね特性	77
3.3.2 せん断ばね特性	80
3.3.3 軸ばね特性	81
3.4 数値解析	84
3.4.1 検証実験	84
3.4.2 解析条件	88
3.4.3 解析結果	90
3.5 まとめ	94
第3章参考文献	95
第4章 積層ゴムの大変形せん断履歴則	97
4.1 はじめに	97
4.2 大変形せん断履歴則	98
4.2.1 履歴則の概要	98
4.2.2 各曲線の定式化	99
4.3 数値解析	103
4.3.1 解析概要	103
4.3.2 検証実験	103
4.3.3 解析条件	105
4.3.4 解析結果	108
4.4 まとめ	112
第4章参考文献	113

第5章 積層ゴムで支持した免震建物の終局挙動解析法	115
5.1 はじめに	115
5.2 解析モデル	116
5.3 運動方程式	118
5.4 解析手順	119
5.5 ばね特性	121
5.5.1 ばね特性の定義	121
5.5.2 鉛プラグの復元力特性	121
5.6 数値解析	121
5.6.1 解析条件	121
5.6.2 解析結果	123
5.6.3 修正マクロモデルを考慮しない解析との比較	135
5.7 まとめ	144
第5章参考文献	145
 第6章 免震建物の終局地震応答解析	 147
6.1 はじめに	147
6.2 建物モデルの設定	147
6.3 解析モデル	152
6.4 入力地震動	153
6.5 解析結果	155
6.5.1 基本応答特性	155
6.5.2 終局挙動	159
6.5.3 長周期地震動に対する応答特性	170
6.5.4 上下動入力の影響	171
6.6 まとめ	176
第6章参考文献	177
 第7章 結論	 179
謝辞	185

第1章 序論

1.1 はじめに

1980年代に免震構造に必要な積層ゴムの開発が始められ、日本初の積層ゴムを使用した免震建物である八千代台免震住宅（千葉県八千代市）が建設されたのは1983年のことである。その後10年間における免震建物の建設件数は年間平均僅か10件程度にとどまり、1994年における総数は80数棟を数えるに過ぎなかった。また、その適用先も建設会社の研究所や寮あるいは集合住宅などの比較的小規模な建物が中心であった。しかし、1995年の兵庫県南部地震を契機として免震構造を取り巻く状況は一変する。同地震の際に、震源地から30km程度はなれた地点に建設された免震建物の地震観測結果より、基礎部での加速度 3m/s^2 が上部構造において約 $1/3$ の 1m/s^2 に低減されたことが確認された。大地震に対する免震の効果が初めて実証されたのである。これ以降、免震構造の有効性が広く認知され適用範囲が拡大されることになり、建築面積の大きい建物や高層建物あるいは比較的軟弱な地盤への適用も見られるようになった。その用途は集合住宅やオフィスビルを中心として、防災拠点となる病院やコンピュータセンターへの適用も積極的に行われるようになった。最近では、告示免震（平成12年建設省告示第2009号）による大臣認定不要ルートが創設され、免震部材が指定建築材料に指定される（平成12年建設省告示第1446号）など、合理的な設計を目指した取り組みがなされている。兵庫県南部地震以降の適用件数は年間平均で150件程度に増加し、2006年末の時点における総数は約2000件を数えるに至っている（ただし免震住宅を除く）^{1.1)}。

免震構造は固有周期の短い建物の長周期化を可能にした技術であり、これまで建物高さが60m以下の中低層建物を中心に適用されてきた。現在もその傾向は変わらないが、1995年以降には高さ60mを超える高層建物への免震構造の適用が見られるようになった^{1.2)}。中低層建物は非免震の場合の応答せん断力が大きいため、これを免震化した場合には応答せん断力が非常に小さくなり、水平地震力の低減効果が大きい。一方、高層建物は非免震の場合でも応答せん断力が小さいので、中低層建物と比較して免震化による地震力低減効果は小さくなる。しかし、上部構造の固有周期が3～4秒の高層建物を免震化した場合でも、非免震に対して50%以上の応答低減効果が得られることが解析的に確認されており、高層建物でも免震の効果をj得ることは十分に可能である^{1.3)}。また、免震構造の高層化と密接に関連する尺度として、建物の高さt幅の比で定義される塔状比（高さ／幅）がある。免震構造の塔状比の変遷について言及す

ると、1994 年以前は幅に対して高さの小さい扁平な形状が多数を占め、塔状比も僅かに 1 件が 2 を超えていたものの平均では 1 を下回っていた。しかし、1995 年以降は細長い形状の建物への適用が増加し、塔状比が 3 を超える建物が 10%を超えているとの報告もある^{1.4)}。

建物の構造設計に目を向けると、現行の耐震設計で想定されていた地震動を遥かに凌ぐ強震動に対しても、倒壊防止あるいは人命保護を確保すべく致命的な損傷が生じない設計を行うことの重要性が増している。このような設計を満足するためには、現状の設計が限界状態に対してどの程度の安全余裕度を有しているかを評価する必要がある。そして、その評価精度をより向上させるためには、限界状態における終局挙動を定量的に把握することが重要な課題となる。一方、近年の免震構造の適用範囲拡大や長周期領域に巨大なパワーを持つ地震動の発生が予測される現状を考慮すれば、安全性の高いとされる免震構造においても終局挙動の把握の重要性は例外ではない。免震構造は建物全体を積層ゴム等の免震部材によって支持するという構造を持つため、免震部材の破壊は建物にとって致命的な損傷となる可能性が高い。すなわち、免震構造では免震部材の破壊をもって限界状態と捉えることができる。従来の塔状比の小さい中低層の免震建物では、転倒モーメントが小さいため上部構造の併進的な運動が卓越しやすい。よって、大入力時においても積層ゴムに引張り力が生じにくく、積層ゴムが圧縮荷重下で大変形を受け座屈的に破壊する状態（以下、座屈破壊と称する）が終局挙動として想定される。一方、免震建物の高層化や塔状比の増大は上部構造に新たな運動パターンを引き起こすとともに、免震建物の終局挙動をさらに複雑化させる要因となった。すなわち、塔状比の大きい高層建物には大きな転倒モーメントが生じるため、上部構造にロッキング的な運動が生じやすい。よって、隅角部の積層ゴムには引張り力が生じる可能性が高く、上部構造の浮き上がりに伴い積層ゴムが引張り破断する状態が終局状態として想定される。さらに、上部構造の並進的な運動に伴う積層ゴムの座屈破壊が混在する場合なども想定され、非常に複雑な終局挙動を呈することが予想される。

これまで実施されてきた免震構造の終局挙動に関する研究は、主として免震部材単体の終局挙動を把握することに重点が置かれてきた。中でも、主要な免震部材である積層ゴムについては数多くの実験的研究が行われおり、積層ゴムに生じる荷重やその形状をパラメータとした圧縮せん断試験あるいは水平変形下における引張り試験等により、水平方向及び鉛直方向の限界性能が確認されている^{1.5)~1.9)}。一方、免震建物の終局挙動の確認を目的として、いくつかの振動台実験が実施されている。上部構造として原子炉建屋を想定した縮小模型による振動台実験では、積層ゴムに引張り破断が

生じるまで加振を行い、設計を大きく超える入力に対しても十分な余裕があること、1つの積層ゴムの破壊がその他の積層ゴムに影響を及ぼさないことなどが確認されている^{1.10)~1.13)}。しかしながら、塔状比が小さい扁平な建物を対象としていること、終局挙動として積層ゴムの座屈が考慮されていないことから、これらの実験から得られた結論に基づき、塔状比の大きい高層建物を含めた一般の免震建物の終局挙動を論じることが難しい。これらの原子炉建屋に関する一連の研究を除けば、積層ゴムの破壊までの終局挙動の把握を試みた実験的研究は行われていない。すなわち、免震建物の終局挙動は未解明の分野である。

免震建物の終局挙動を解析等により予測する手法としては、一般に時刻歴応答解析が有効である。積層ゴムが引張りを受ける場合については、積層ゴムの力学モデルとして、大変形域でのハードニング現象を表す水平ばね及び引張り降伏を考慮した鉛直ばねを採用することにより、終局挙動を概ね追跡することができる。原子炉建屋や塔状比の大きい免震建物について、模型を対象とした振動台実験の数値解析により、この種の解析手法の妥当性が確認されている^{1.14)、1.15)}。一方、圧縮荷重を受ける積層ゴムは、水平変形の増大に伴い水平復元力や鉛直剛性が低下する性質を有し、さらに過大な水平変形下では最終的に鉛直荷重支持能力を失い、座屈破壊へと至ることが知られている^{1.5)~1.7)}。従って、積層ゴムが過大な水平変形下で座屈破壊するような終局挙動を解析する場合には、積層ゴムの大変形域における複雑な復元力特性を精度よく表現する力学モデルが必要となる。しかし、これまでに積層ゴムの座屈破壊で終局となる場合について地震応答解析を試みた例は見られない。

以上の背景の下、本論では、積層ゴムで支持された免震建物が、現状の設計で想定されている入力レベルを大きく超える地震動入力を受けた場合の終局挙動を解明することを目的とする。ここでいう終局挙動とは、過大な入力によって上部構造にロックイン的な挙動が現れ、積層ゴムに引張り荷重あるいは過大な圧縮荷重が生じるとともに、その直径に相当するような水平変形が生じ、最終的に積層ゴムに座屈破壊あるいは引張り破断が生じる状態を表す。

免震建物の終局挙動を解明していくに際し、まず初めに縮小免震建物模型による振動台実験を実施する。終局挙動に影響を与える要因として積層ゴムの形状と塔状比を選定し、いくつかのパターンの終局挙動が生じるように、これらの変数を適宜組み合わせる。実験では加振レベルを増加させることにより、積層ゴムの破壊による終局挙動を生じさせる。実験結果より、積層ゴムの破壊状況や上部構造の運動状態に応じて終局挙動のパターンを分類し、それらの挙動を詳細に分析する。

続いて、免震建物の終局挙動を予測できる時刻歴応答解析法を提示する。積層ゴム

に引張り変形が生じる場合については、既にいくつかの解析手法が提案されている1.14)、1.15)ことから、過大な水平変形下で積層ゴムに座屈破壊が生じる場合の終局挙動に着目する。ここで用いた解析法は、積層ゴムの特性をせん断ばね、回転ばね、軸ばね及び剛体要素から構成されるマクロモデルによって表し、そのせん断ばねの特性として大変形の履歴性状をできるだけ忠実に模擬した履歴則を採用している点が特徴である。振動台実験のうち、過大な水平変形下で積層ゴムに座屈が生じた実験ケースを対象とした数値解析を実施するとともに、一般に採用されている終局地震応答解析法（積層ゴムの引張りは考慮するが、座屈は考慮しない解析法）との比較により、本解析法の有効性を検証する。さらに、実際の免震建物が極限的な地震動を受けた時の終局挙動を把握するため、提案された解析法を用いた地震応答解析を行い、種々の要因が終局挙動に与える影響について検討する。

1.2 論文の構成

本論文は第1章から第7章で構成されており、各章の内容は下記の通りである。

まず初めに、第1章で本論文の背景、目的、構成について示した後、第2章では、免震建物の終局挙動の把握を目的として実施した、縮小免震建物模型の振動台実験の結果について述べる。本実験は、塔状比の大きい建物を想定して積層ゴムの破壊までの加振を行ったこと、終局挙動に影響を与える要因をパラメトリックに扱ったことが特徴である。実験要因としては、上部構造の塔状比と積層ゴムの形状・面圧（鉛直荷重／積層ゴム断面積）を採用した。塔状比は4及び6の2ケース、積層ゴムの形状・面圧は、直径90mm、ゴム総厚22mm・面圧7.55MPaと直径110mm、ゴム総厚22mm・面圧5.05MPaの2ケースを設定している。実験で用いた積層ゴムは、減衰機能を併せ持った鉛プラグ入り積層ゴム（LRB）及び高減衰積層ゴム（HDB）である。これらを組み合わせた6ケースについて、BCJ-L2波の振幅拡張波の水平1方向入力により積層ゴムが破壊に至るまで加振を行う。実験結果より、大入力時において上部構造に生じる運動パターンを分類し、それらの運動パターンに対して塔状比及び積層ゴムの形状・面圧が及ぼす影響を検討する。また、終局直前と終局時における積層ゴムの詳細な挙動を、時刻歴波形、荷重－変形曲線さらにビデオカメラのキャプチャー画像を用いて明らかにする。最後に、縮小試験体を用いて実施した本実験による終局加振レベルを評価するため、実大規模の実験結果も含めた積層ゴムの圧縮及び引張りに関する限界性能線との比較を行う。

第3章では、第5章で提示する免震建物の終局挙動解析法で用いる積層ゴムの大変形挙動を表すモデルについて述べる。圧縮荷重下で単調載荷による水平変形を受ける

積層ゴムの終局挙動を評価し得る簡便なモデルとして、大変形マクロモデルが提案されている^{1.16、1.17}。大変形マクロモデルは、せん断ばね、回転ばね及び剛体要素によって積層ゴムを表したモデルであり、各ばねの非線形特性を考慮することにより、積層ゴムの大変形時における非線形挙動を表現することができる。しかし、軸方向のばねを持たないため鉛直剛性を直接評価することができず、このモデルを地震応答解析等に用いることができない。そこで、新たに非線形特性を有する軸ばねを付け加えることにより、地震応答解析にも対応可能な新規マクロモデル（修正マクロモデル）を提案する。さらに、修正マクロモデルの精度を確認するため、積層ゴム単体の実験結果の数値解析を実施する。

繰り返し大変形を受ける積層ゴムの水平復元力特性は、ハードニングや大変形経過後の繰り返しによる剛性低下及び除荷時履歴ループの膨らみ等の強い非線形特性を有する^{1.5)~1.7)}。第3章で提案した修正マクロモデルは単調載荷時の大変形挙動を表すものであり、これを建物の地震応答解析に適用するためには、ばね特性に繰り返しの影響を考慮する必要がある。そこで、第4章では、修正マクロモデルのせん断ばね特性に適用する履歴則として、簡単な曲線式で構成した積層ゴムの大変形せん断履歴則について述べる。そして、本履歴則の有効性を検証するために、積層ゴム単体の実験結果の数値解析を実施する。初めに、鉛直荷重ゼロのケースを対象として本履歴則による積層ゴム履歴性状の再現性を確認する。そして、修正マクロモデルへの適用性を確認するため、修正マクロモデルのせん断ばね特性に本履歴則を適用し、圧縮荷重下における解析も実施する。

第5章では、免震建物の終局挙動を予測できる時刻歴応答解析法を提示するとともに、振動台実験の数値解析を実施し、解析手法の妥当性及び有効性を検討する。提案手法を要約すると以下の通りとなる。積層ゴムの水平特性及び鉛直特性を表すモデルとしては、第3章で述べた修正マクロモデルを適用する。また、修正マクロモデルのせん断ばねの特性として、第4章で提案した大変形域でのハードニングや繰り返しの伴う剛性低下等を表すせん断履歴則を採用する。運動方程式を解く数値積分法としては、修正マクロモデルの復元力を直接フィードバックできる中央差分法（衝撃加速度法）を用いる。

第6章では、実際の免震建物が極限的な地震動を受けた時の終局挙動を把握するため、第5章で提示された終局挙動解析法を用いて免震建物の地震応答解析を実施する。解析では、いくつかの代表的な免震建物モデルを設定し、建物高さ、積層ゴムの配置、入力地震動等の要因が終局挙動に与える影響について検討する。

第7章では、本論文から得られた成果を、章毎に得られた知見としてまとめている。

第 1 章参考文献

- 1.1) 日本免震構造協会：MENSIN、No.61、pp.25-26、2008.8.
- 1.2) 大宮幸、寺本隆幸：免震建物の調査研究－公表されたデータに基づく免震建物の傾向把握－、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.513-514、2006.9.
- 1.3) 小倉桂治、川端一三、小室努、征矢克彦、寺嶋知宏：高層免震建物の地震応答特性に関する検討、日本建築学会技術報告集第 5 号、pp.47-51、1997.12.
- 1.4) Pan, P., Zamfirescu, D., Nakashima, M., Nakayasu, N., and Kashima, H. : Base-isolation design practice in Japan: introduction to the post-kobe approach: Journal of Earthquake Engineering, Vol9, No. 1(2005) 147-171.
- 1.5) 高山峯夫：免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能、日本建築学会技術報告集、第 1 号、pp.160-165、1995.12.
- 1.6) 八坂厚彦、水越熏、飯塚真巨、高林勝人：形状係数をパラメータとした積層ゴムの限界特性実験（その 1 復元力特性）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、pp.599-600、1991.9.
- 1.7) 水越熏、八坂厚彦、飯塚真巨、高林勝人：形状係数をパラメータとした積層ゴムの限界特性実験（その 2 破壊限界特性）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、pp.601-602、1991.9.
- 1.8) 菊地優、北村佳久、林章二、河島庸一、坂口達、山田親文：引張力を受ける積層ゴムの復元力特性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 524 号、pp.57-64、1999.10.
- 1.9) 高岡栄治、飯塚真巨、二村有則：引張軸力下における積層ゴムの力学特性に関する研究、鹿島技術研究所年報第 48 号、pp.169-174、2000.9.
- 1.10) 鬼丸貞友、加藤朝朗、鶴巻静雄、広谷勉、小山実：FBR 免震型プラントの構築に関する研究 その 11 免震層の動的破断試験（試験結果の概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、pp.1569-1570、1992.8.
- 1.11) Kato M, Watanabe Y, Kato A, Koshida H, Mizukoshi K, Fukushima Y, Nojima O, Yoneda G, Onimaru S: Dynamic breaking tests on base-isolated FBR plant, 12th SMiRT, Vol.K2, pp.267-272, 1993.
- 1.12) Moteki M, Kawai N, Ishida K, Yabana S, Nojima O: Shaking table test on ultimate behavior of seismic isolation system. Part 1: Outline of the test and response of superstructure, Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Vol.4, pp.2271-2276, 1992.
- 1.13) Ishida K, Shiojiri H, Yoneda G, Matsuda A: Shaking table test on ultimate behavior of

seismic isolation system. Part 2: Response behavior of rubber bearings, Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Vol.4, pp.2411-2416, 1992.

- 1.14) Ishida K, Yabana S, Yoneda G, Suhara J, Yoshikawa K : Analytical study on ultimate response characteristics of base isolated structure. 12th SMiRT, Vol.K2, pp.309-314, 1993.
- 1.15) 二村有則、竹中康雄、高岡栄治、吉川和秀 : 塔状免震建物の終局挙動に関する解析的研究 その 1 積層ゴムの引抜きを対象とした解析手法、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.841-842、2005.9.
- 1.16) 飯塚真巨 : 圧縮軸力・水平力同時作用下における免震用積層ゴムの大変形マクロモデル、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 B、pp.721-722、1992.8.
- 1.17) 日本建築学会編 : 免震構造設計指針第 2 版、pp.545-563、1993.

発表論文リスト

査読論文：

- (1) 高岡栄治、飯塚真巨：積層ゴムの大変形せん断履歴則、構造工学論文集 Vol.47B、pp.133-138、2001.3.
- (2) 高岡栄治、二村有則、飯塚真巨、竹中康雄、吉川和秀：積層ゴムで支持した塔状免震建物の終局挙動に関する振動台実験、日本建築学会構造系論文集、第 605 号、pp.87-93、2006.7.
- (3) 飯塚真巨、高岡栄治：ばねと剛体要素から成る積層ゴム用離散型力学モデル、日本建築学会構造系論文集 第 607 号 pp81-85、2006.9.
- (4) 高岡栄治：積層ゴムの座屈破壊を対象とした免震建物振動台実験のシミュレーション解析、日本建築学会構造系論文集、第 613 号、pp.51-57、2007.3.

会議論文：

- (1) 飯塚真巨、高岡栄治、竹中康雄、吉川和秀：積層ゴムと滑り支承を併用した免震構造の振動台実験、第 10 回地震工学シンポジウム、pp.201-206、1998.11.

口頭発表：

- (1) 飯塚真巨、高岡栄治：積層ゴムの安定限界水平変形の評価法、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.709-710、1996.9.
- (2) 高岡栄治、八坂厚彦、飯塚真巨：滑り支承と積層ゴム併用免震システムの開発（その 1 低摩擦滑り支承特性試験）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.733-734、1996.9.
- (3) 飯塚真巨、高岡栄治、小檜山雅之、芳沢利和、鈴木重信、菊地隆志：積層ゴムの設計に関する一考察、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.505-506、1997.9.
- (4) 菊地隆志、飯塚真巨、芳沢利和、高岡栄治、鈴木重信、小檜山雅之：引き抜きを受けた積層ゴムの特性変化について、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.539-540、1997.9.
- (5) 高岡栄治、飯塚真巨、竹中康雄、吉川和秀：滑り支承と積層ゴム併用免震システムの開発（その 2 振動台実験の結果）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.665-666、1997.9.
- (6) 吉川和秀、竹中康雄、飯塚真巨、高岡栄治：滑り支承と積層ゴム併用免震システ

- ムの開発(その3 シミュレーション解析)、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.667-668、1997.9.
- (7) 竹中康雄、飯塚真巨、二村有則、吉川和秀、高岡栄治：塔状免震建物の終局挙動に関する振動台実験(その1) 実験計画と終局時挙動の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.783-784、1999.9.
- (8) 二村有則、飯塚真巨、竹中康雄、吉川和秀、高岡栄治：塔状免震建物の終局挙動に関する振動台実験(その2) 入力強さと最大応答値の関係、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.785-786、1999.9.
- (9) 飯塚真巨、二村有則、竹中康雄、吉川和秀、高岡栄治：塔状免震建物の終局挙動に関する振動台実験(その3) 積層ゴムの形状・面圧と終局挙動の関係、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.787-788、1999.9.
- (10) 飯塚真巨、二村有則、竹中康雄、吉川和秀、高岡栄治：塔状免震建物の終局挙動に関する振動台実験(その4) 塔状比と終局挙動の関係、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.645-646、2000.9.
- (11) 吉川和秀、飯塚真巨、竹中康雄、二村有則、高岡栄治：塔状免震建物の終局挙動に関する振動台実験(その5) 積層ゴム種と終局挙動の関係、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.647-648、2000.9.
- (12) 二村有則、飯塚真巨、竹中康雄、吉川和秀、高岡栄治：塔状免震建物の終局挙動に関する振動台実験(その6) ストッパーが終局挙動に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.649-650、2000.9.
- (13) 高岡栄治、飯塚真巨、芳沢利和、鈴木重信：変動圧縮軸力を受ける積層ゴムの力学挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.691-692、2000.9.
- (14) 二村有則、竹中康雄、吉川和秀、高岡栄治：塔状免震建物の終局挙動実験に関する解析的研究 その1 積層ゴムの引抜きを対象とした解析手法、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.841-842、2005.9.
- (15) 高岡栄治、竹中康雄、二村有則、吉川和秀：塔状免震建物の終局挙動実験に関する解析的研究 その2 積層ゴムの座屈を対象とした終局挙動解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.843-844、2005.9.
- (16) 飯塚真巨、高岡栄治：ばねと剛体要素から成る積層ゴムの離散型力学モデル その1 モデルの概要と線形ばねモデル、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.563-564、2006.9.
- (17) 高岡栄治、飯塚真巨：ばねと剛体要素から成る積層ゴムの離散型力学モデル その2 非線形ばねモデルへの拡張、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、

pp.565-566、2006.9.

- (18) 高岡栄治、引田真規子、竹中康雄、室田伸夫：端部回転を考慮した積層ゴムの力学挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.909-910、2007.8
- (19) 高岡栄治、引田真規子、竹中康雄、奥津宣幸：端部回転を考慮した免震装置の力学挙動（その 1 鉛プラグ入り積層ゴム・高減衰積層ゴムの加力実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2008.9.
- (20) 中村栄作、高岡栄治、竹中康雄、河合俊直、上田栄：端部回転を考慮した免震装置の力学挙動（その 2 滑り支承の加力実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2008.9.

第2章 積層ゴムで支持した塔状免震建物の振動台実験

2.1 はじめに

免震建物の性能や挙動を確認するための一つの有効な手段として、縮小模型等を用いた振動台実験がこれまでも数多く実施されてきた。特に終局挙動の把握を目的としたものとしては、上部構造として塔状比の小さい扁平な原子炉建屋を想定した実験が行われており、積層ゴムに引張り破断が生じて終局となるまでの挙動が確認されている^{2.1~2.4)}。また、上部構造の塔状比の大きい試験体を用いて大入力に対する挙動を確認する実験も実施されている。猿田等^{2.5)}は高減衰積層ゴムと塔状比 6.2 の試験体を用いた実験を、久野等^{2.6)}は弾性滑り支承と積層ゴムを組み合わせた構法と塔状比 5 の試験体を用いた実験を実施し、それぞれ既往地震波 1.0m/s 相当の入力時に積層ゴムに引張りが生じるが、その後の挙動に大きな影響を与えないことを確認している。また、三山等^{2.7)}は積層ゴムとオイルダンパーを組み合わせた構法と塔状比 5 の試験体を用いた実験より、振動台実験の積層ゴム特性が理論値と対応することを確認した他、引張りが生じた後の着座による最大荷重が予測できることを示した。しかし、これまで積層ゴムの形状や塔状比など終局挙動に影響を与えると考えられる要因をパラメトリックに扱い、積層ゴムの破壊までの終局挙動の把握を目的とした研究は行われていない。

以上の背景の下、積層ゴムで支持した免震建物の終局挙動を解明することを目的として、縮小免震建物模型を用いた振動台実験を実施した。実験要因として、上部構造の塔状比、積層ゴムの形状・面圧を採用し、水平 1 方向入力により積層ゴムが破壊に至るまで加振した。実験結果より、各要因が終局挙動に与える影響について検討するとともに終局時における上部構造と積層ゴムの詳細な挙動について分析した。

2.2 実験要因と実験ケース

免震建物の終局挙動に影響を与える要因を総ざらいし、各要因が支配的であるか否かの評価を行った。表 2.1 に要因とその評価結果を示す。これより、終局挙動に支配的に影響を与える要因として、上部構造の塔状比と積層ゴムの形状・面圧（鉛直荷重／積層ゴム断面積）を選定することとした。塔状比は、上部構造の高さ H と最外縁に配置した積層ゴムの軸芯間距離 B の比 (H/B) で定義し、最近の集合住宅等の設計でも用いられる 4 及び現状の設計における限界値と考えられる 6 の 2 ケースを設定した。積層ゴムの形状は、後述の想定構造物における原型の大きさで設定し、ゴム総厚 h を共通の 200mm、直径 D を 800mm 及び 1000mm の 2 ケースとした。2 次形状係数 $S_2(D/h)$ はそれぞれ 4.0 及び 5.0 であり、想定構造物における面圧はそれぞれ 7.90MPa 及び 5.05MPa である。積層ゴムメーカーの提示する技術資料^{2.10)}によれば、積層ゴムの長期面圧は積層ゴムの形状や材料に応じて定められ、前者では 8.5MPa、後者では 13MPa が推奨されている。一般に、相対的に直径の小さい積層ゴムを高面圧で使用した場合、大変形時に水平力の低下が生じやすくなり、相対的に直径の大きい積層ゴムを低面圧で使用した場合、逆にハードニングが生じやすくなる^{2.11)}。よって、直径 800mm については、大変形時において水平力の低下が生じることを、直径 1000mm についてはハードニングが生じることを想定し、形状を選定している。

積層ゴムは、減衰機能を併せ持った鉛プラグ入り積層ゴム (LRB) 及び高減衰積層ゴム (HDB) を用いた。なお、表 2.1 では、積層ゴムのゴム材料の違いについては、終局挙動の要因として重要度を高く評価していないが、一般にはこれらの積層ゴムが多用されていることから要因として無視できないと判断した。

以上を組み合わせた実験ケースを表 2.2 に示す。実験ケースは、LRB について塔状比と積層ゴム形状の全組合せである 4 ケース (ケース①～④)、HDB について 2 ケース (ケース⑤、⑥) の合計 6 ケースである。

2.3 試験体

2.3.1 試験体概要

免震建物の上部構造柔性が終局挙動に及ぼす影響は小さいと考えられるため (表 2.1 参照)、上部構造は剛体を想定することとし、直径 D が 800mm 又は 1000mm の積層ゴム 4 体で支持された剛な免震建物を設定した。試験体は、表 2.3 に示す相似則に従い原型を 1/9 に縮尺した縮小模型である。表 2.3 より、本実験では、原型と模型の加速度及び応力度が等しくなる。なお、縮尺率は原型の積層ゴムの忠実に縮小した模型積層ゴムが製作できることを条件に定めた。試験体の全景を写真 2.1 に、試験体

の形状・寸法を図 2.1 に示す。

2.3.2 上部構造

上部構造は、鉄筋コンクリート製のブロック（約 4.9ton／個）4 個をモルタルを介して積み重ね、PC 鋼棒で締めつけて一体化させたものである。総質量は実測値で 19.6ton、全体寸法は短辺 1,300mm×長辺 1,600mm×高さ 4,000mm である。以下ではこの上部構造を「重錘」と呼ぶ。塔状比の 2 ケースは、短辺方向の積層ゴム軸芯間距離 B を変えることによって調整し、塔状比 4 では B を 1,000mm、塔状比 6 では 680mm にそれぞれ設定した。なお、後者では厳密には H/B の値が 5.88 となるが、誤差が 2%であることを考慮し、塔状比の値として 6 を用いることとした。

2.3.3 積層ゴム

模型積層ゴムの形状を図 2.2、2.3 に、形状・諸元を表 2.4 に、材料の物性規格を表 2.5 に示す。積層ゴムの形状は、ゴム 1 層厚 t_r とゴム総厚 h が全ケース共通で 1mm と 22mm であり、直径 D が 90mm 及び 110mm、1 次形状係数 $S_1 (=D/4t_r)$ が 22.5 及び 27.5、2 次形状係数 $S_2 (=D/h)$ が 4.1 及び 5.0 である。また、積層ゴムの面圧は 7.55MPa 及び 5.05MPa である。表 2.6 に、これらの積層ゴムを用いた場合の試験体全体の力学特性設計値を示す。原型の水平変形 250mm 時に相当する等価固有周期は、LRB の場合が 1.02 秒及び 0.835 秒、HDB の場合が 0.951 秒及び 0.777 秒である。これを原型に換算すると、LRB が 3.07 秒及び 2.51 秒、HDB が 2.85 秒及び 2.33 秒である。また、鉛プラグの降伏せん断力係数（降伏せん断力／重錘総重量）は 0.0441 及び 0.0659 である。積層ゴムは、写真 2.2 に示すように、水平及び鉛直の 2 方向荷重計（分力計）とレベリング装置を介して振動台に固定した。レベリング装置は、ボルトを回転させて高さを微調整することにより、各積層ゴムの支持荷重を均等にするための装置である。

表 2.1 実験要因と評価

要 因	重要度	評価
上部構造の 塔状比	◎	塔状比が大きくなると転倒モーメントが大きくなり、積層ゴムに引張り力あるいは過大な圧縮荷重が生じ、それらが終局応答を支配する。従って、塔状比は最も重要な要因である。
積層ゴムの 形状・面圧 (復元力特性)	◎	積層ゴムが大変形を受けると水平復元力の低下やハードニングが生じる。このような挙動は積層ゴムの形状と面圧に依存する。復元力特性の変動は、当然ながら終局応答に支配的な影響を与える。
擁壁への衝突	○	擁壁に衝突した後、上部構造にはロッキング的な挙動が生じることが予想される。この時、積層ゴムには大きな荷重変動が生じ、終局挙動に影響を与える可能性が高い。ただし、終局挙動が解明され基本的なモデルが構築されれば、衝突後の現象については、擁壁を適切にモデル化 ^{2.8)} することにより、解析による予測が可能と考えられる。
積層ゴムの配置	○	上部構造を剛体と仮定した検討によれば、積層ゴムが建物幅内に均等に配置されている場合、積層ゴムの数が多くなるほど、浮き上がり挙動が生じやすくなる ^{2.9)} 。この要因についても、適切なモデルが構築されれば、解析によって予測が可能である。
上下動	○	過大な上下動によって積層ゴムに引張り変形が生じる可能性がある。ただし、水平動と比較して上下動が上部構造の挙動に与える影響は小さく、終局時の破壊形式に与える影響は小さいと考えられる。
縮尺比	△	積層ゴムの直径が大きくなると、受圧面積に対する応力分布が不均一になりやすいため、積層ゴム破壊時の変形などは縮尺比の影響を受ける可能性がある。よって、終局時の入力レベルの評価については注意が必要であるが、縮尺比が免震建物の応答性状や破壊形式に与える影響は小さいと考えられる。
上部架構の 柔性	△	終局挙動には1次の振動モードが直接影響すると考えられる。また、この要因は適切なモデルが構築されれば、解析によって予測が可能である。
積層ゴムの ゴム材料	△	ゴム材料により、ハードニングが始まるせん断ひずみの大きさが異なるが、それによって終局挙動が大きく左右されるとは考えにくい。
入力地震動	×	破壊の入力レベルには入力地震動が大きく影響するが、応答性状や破壊形式が入力地震動によって異なるとは考えられない。今回の実験では、どのくらいの強さまで耐えられるのかということではなく、どのような挙動が生じるかに着目している。従って地震波は1波に決めればよい。

表 2.2 実験ケース

		塔状比 (H/B)	
		4	6
原型積層ゴム 形状・面圧 ($h=200\text{mm}$)	$D=800\text{mm}$ 、 $S_2=4.0$ $\sigma=7.90\text{MPa}$	ケース① (LRB)	ケース③ (LRB)
		ケース⑤ (HDB)	
	$D=1000\text{mm}$ 、 $S_2=5.0$ $\sigma=5.05\text{MPa}$	ケース② (LRB)	ケース④ (LRB)
			ケース⑥ (HDB)

表 2.3 相似則 ($\lambda=9$)

項目	(模型) / (原型)	項目	(模型) / (原型)
時間 (周期)	$1/\sqrt{\lambda}$	力 (重量)	$1/\lambda^2$
加速度	1	剛性	$1/\lambda$
速度	$1/\sqrt{\lambda}$	応力度	1
変位 (長さ)	$1/\lambda$	ひずみ度	1



写真 2.1 試験体全景

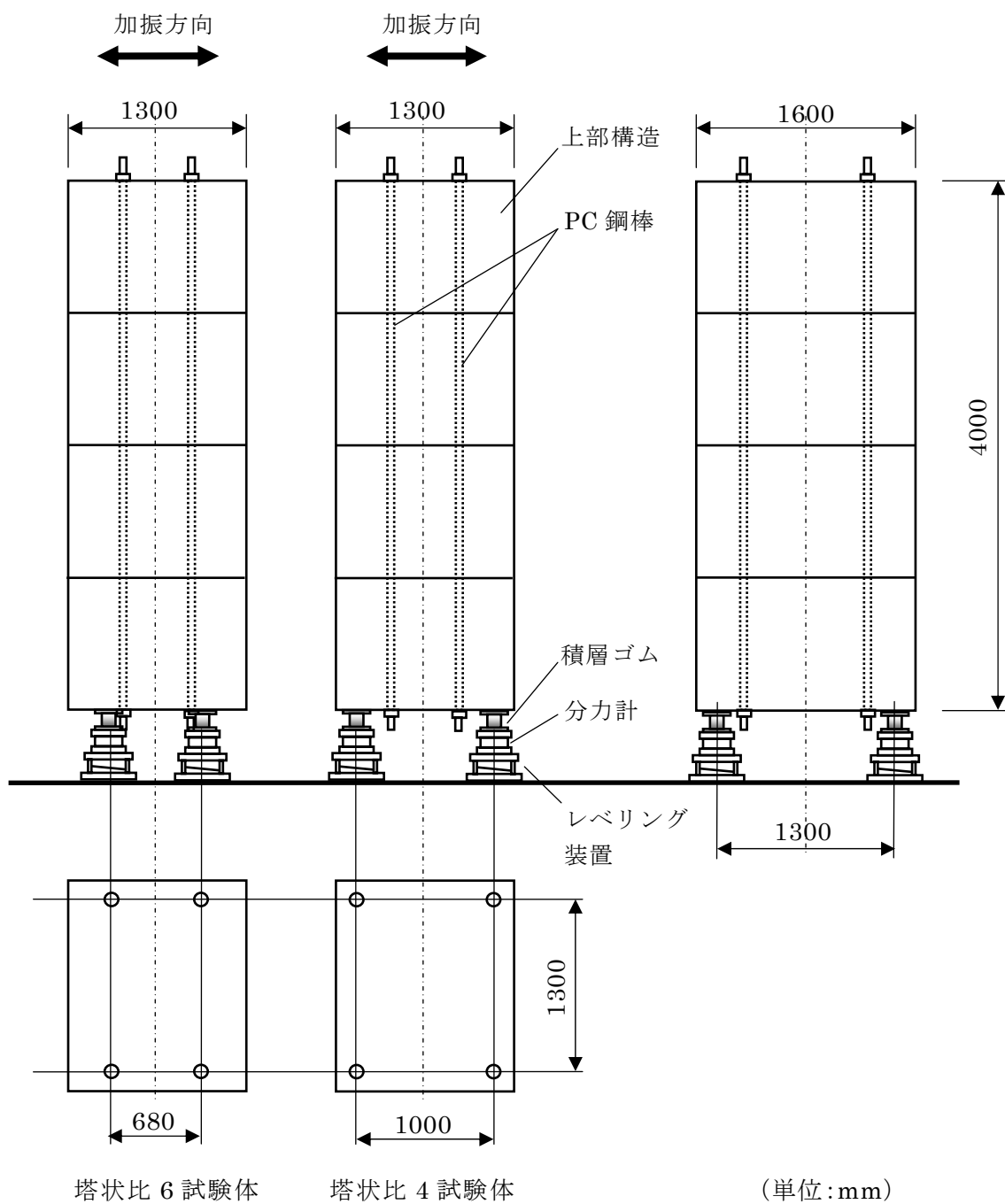
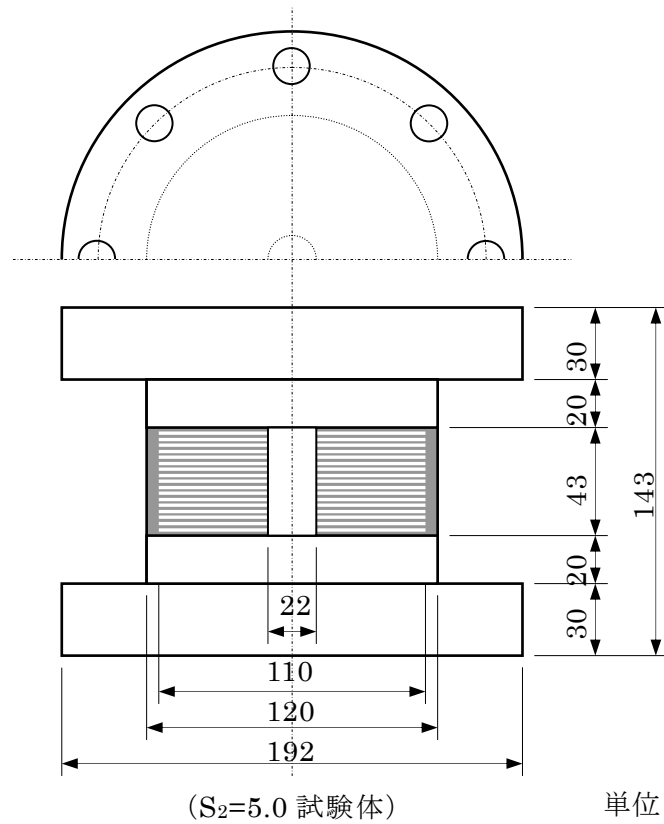
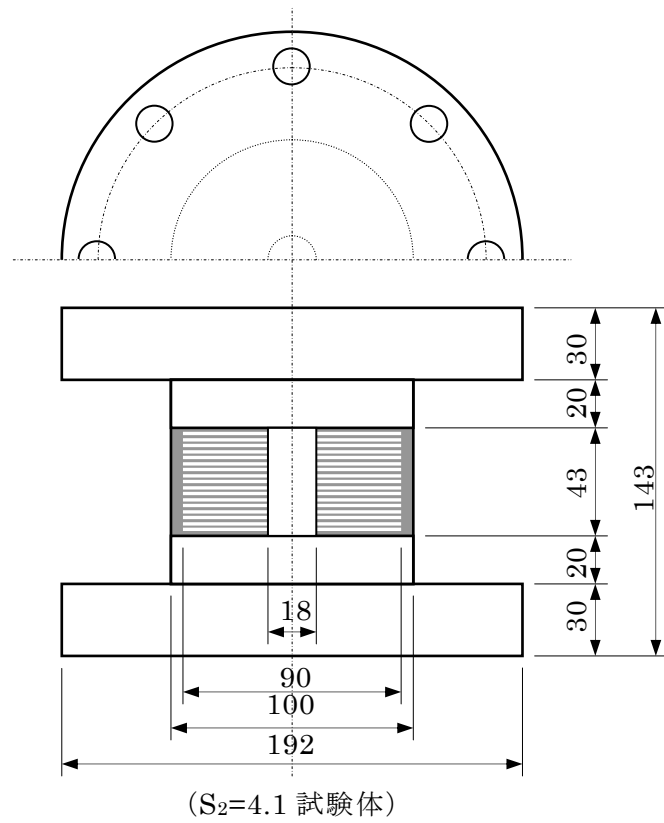
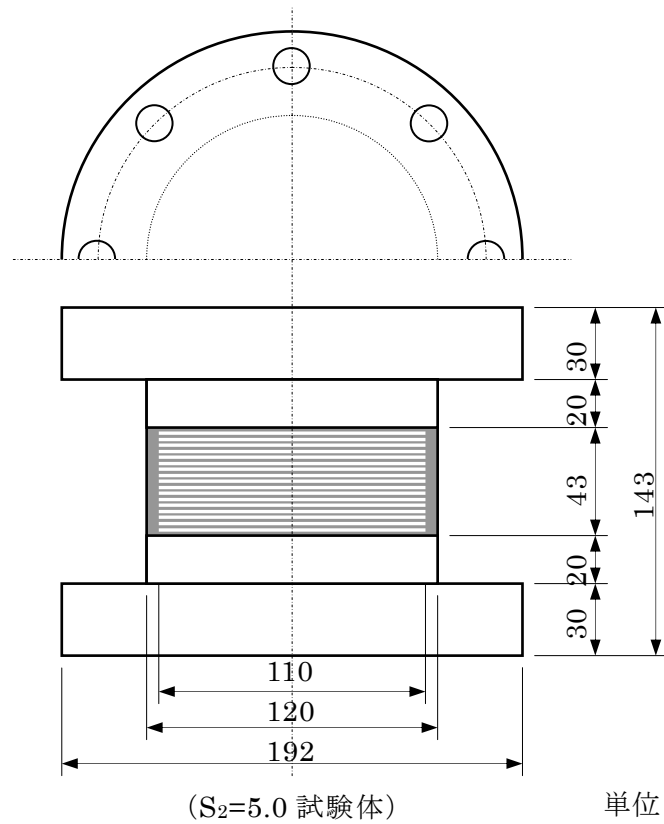
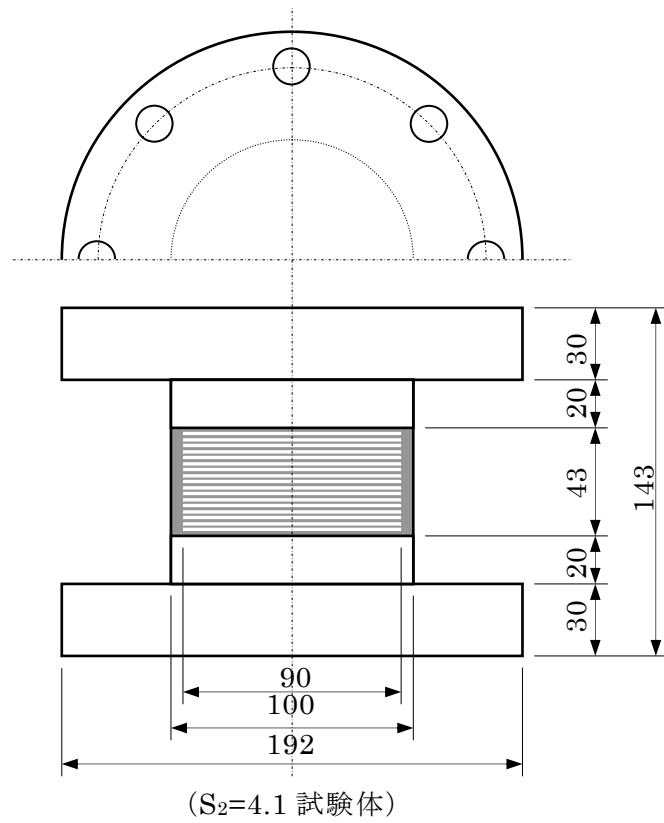


図 2.1 試験体の形状・寸法



単位：mm

図 2.2 積層ゴム試験体の形状・寸法 (LRB)



単位：mm

図 2.3 積層ゴム試験体の形状・寸法（HDB）

表 2.4 積層ゴム試験体の形状・諸元

積層ゴム種類	LRB		HDB	
実験ケース	①、③	②、④	⑤	⑥
直径 D (外径) (mm)	90	110	90	110
内径 (鉛径) (mm)	18	22	—	—
ゴム 1 層厚 t_r (mm)	1.0		1.0	
ゴム総厚 h (mm)	22		22	
中間鋼板厚 (mm)	1.0		1.0	
ゴム総高さ l (mm)	43		43	
1 次形状係数 S_1	22.5	27.5	22.5	27.5
2 次形状係数 S_2	4.1	5.0	4.1	5.0
支持荷重 (kN)	48.0		48.0	
面圧 (MPa)	7.55	5.05	7.55	5.05

表 2.5 材料の物性規格

項目		LRB	HDB
ゴム	硬度 (JIS A) (度)	39±4	67±5
	引張り強度 (MPa)	17.7 以上	9.8 以上
	破断伸び (%)	600 以上	650 以上
	せん断弾性係数 G (MPa)	0.392	0.392
	縦弾性係数 E (MPa)	2.20	3.43
	体積弾性係数 E_∞ (MPa)	1200	1500
	ゴム硬度による補正係数 κ	0.85	1.0
鉛	引張り強度 (MPa)	11.8～22.5	—
	伸 び (%)	40～50	—
	降伏せん断応力 (MPa)	8.33	—

表 2.6 LRB 試験体の力学特性設計値

実験ケース	①③	②④
第 2 剛性(積層ゴム 4 体) ($\times 10^5 \text{N/m}$)	4.35	6.51
第 2 剛性相当周期 (原型換算値) (s)	1.33 (4.00)	1.09 (3.27)
*等価剛性(積層ゴム 4 体) ($\times 10^5 \text{N/m}$)	7.40	11.1
*等価固有周期 (原型換算値) (s)	1.02 (3.07)	0.835 (2.51)
鉛直剛性(積層ゴム 4 体) ($\times 10^5 \text{N/m}$)	8052	13770
鉛直固有振動数 (原型換算値) (Hz)	32.3 (10.8)	42.2 (14.1)
鉛プラグの降伏せん断力係数	0.0441	0.0659

*原型で 250mm 変形に相当する値

表 2.7 HDB 試験体の力学特性設計値

実験ケース	⑤	⑥
*等価剛性(積層ゴム 4 体) ($\times 10^5 \text{N/m}$)	8.56	12.8
*等価固有周期 (原型換算値) (s)	0.951 (2.85)	0.777 (2.33)
鉛直剛性(積層ゴム 4 体) ($\times 10^5 \text{N/m}$)	12120	20120
鉛直固有振動数 (原型換算値) (Hz)	39.6 (13.2)	51.0 (17.0)

*原型で 250mm 変形に相当する値

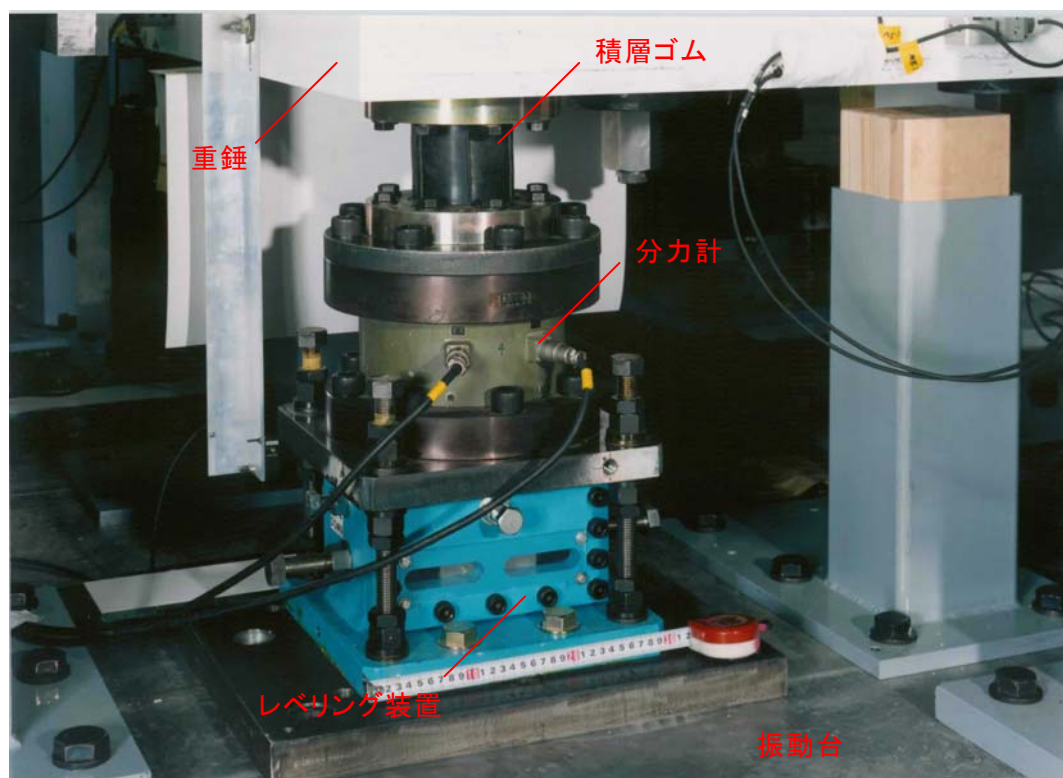
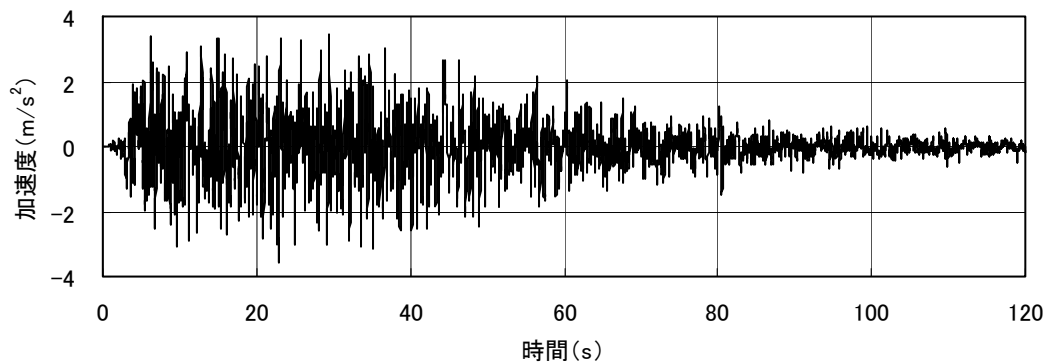


写真 2.2 積層ゴム設置状況

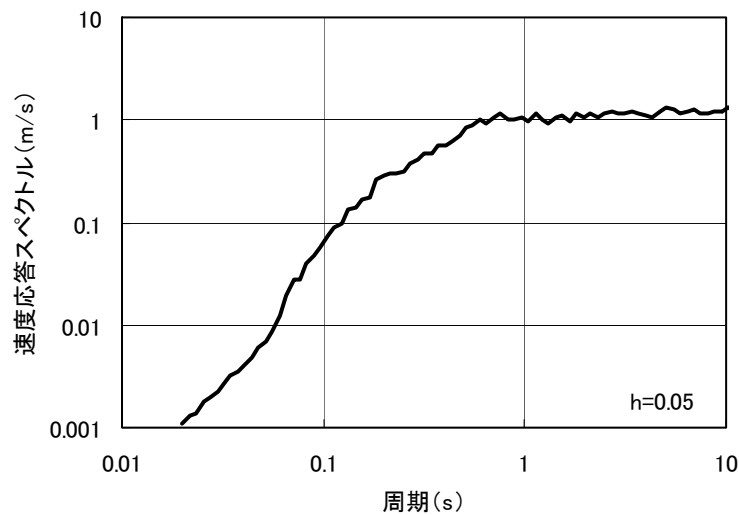
2.4 実験方法

2.4.1 加振方法

入力地震動は BCJ-L2 波^{2.12)}を用いた。図 2.4 に BCJ-L2 波の加速度時刻歴波形と速度応答スペクトル ($h=5\%$) を示す。加速度の最大値は 3.56m/s^2 であり、10 秒までの長周期域で高く安定したパワーを持つ。実験時には、これを相似則 (表 2.3 参照) に従い時間軸を $1/3$ に縮小し、さらに振動台の加振性能を考慮して 3 秒以上の長周期成分をカットして入力した。入力方向は短辺水平 1 方向とした。加振レベルは、原波を規準として 0.5 倍、1.0 倍・・・と 0.5 倍刻みで、積層ゴムが破壊するまで加速度振幅を増幅させた。以下では加振レベルを「倍率×L2」と表記する。表 2.8 に実験に用いた振動台の主な性能・仕様を示す。



(a)加速度時刻歴波形



(b)速度応答スペクトル

図 2.4 入力波 (BCJ-L2 波)

表 2.8 振動台の主な性能・仕様

項 目	X方向(水平)	Y方向(水平)	Z方向(鉛直)
加速度	$\pm 20 \text{ m/s}^2$		$\pm 20 \text{ m/s}^2$
速 度	$\pm 1 \text{ m/s}$		$\pm 0.5 \text{ m/s}$
変 位	$\pm 0.2 \text{ m}$		$\pm 0.2 \text{ m}$
テーブル平面寸法	5m×5m		
定格搭載可能質量	30ton		

2.4.2 測定方法

主な測定項目は、重錘の加速度と変位、積層ゴムの荷重である。重錘については、上端、重心、下端位置の水平加速度及び鉛直加速度をサーボ型加速度計（測定範囲： $\pm 100 \text{ m/s}^2$ ）で、重心と下端の水平変位をインダクタンス式変位計（測定範囲： $\pm 300 \text{ mm}$ ）で、下端四隅の鉛直変位をレーザー変位計（測定範囲： $\pm 40 \text{ mm}$ 及び $\pm 100 \text{ mm}$ ）でそれぞれ測定した。加速度計と変位計の設置位置を図 2.5 に示す。積層ゴムの水平変形は重錘下端の水平変位で代用し、積層ゴムの鉛直変形は、重錘四隅の鉛直変位を積層ゴム位置の変位に換算して求めることとした。

積層ゴムの水平力と鉛直荷重は積層ゴムに直結した分力計（測定範囲：水平 125kN、鉛直 750kN）によって測定した。水平変形と水平力の極性は入力波の符号と対応させた。鉛直変形については、加振前の静止した状態（静止時）を原点とし、上方を正とした。鉛直荷重については静止時を原点とし、引張り側を正、圧縮側を負とするが、重錘重量分を差し引いて荷重がかかっていない状態が原点となるように後で補正した。測定サンプリングは 200Hz とした。

また、積層ゴムの変形状況を振動台上に設置したビデオカメラを用いて録画したほか、試験体全体の動きについてもビデオカメラで録画した。

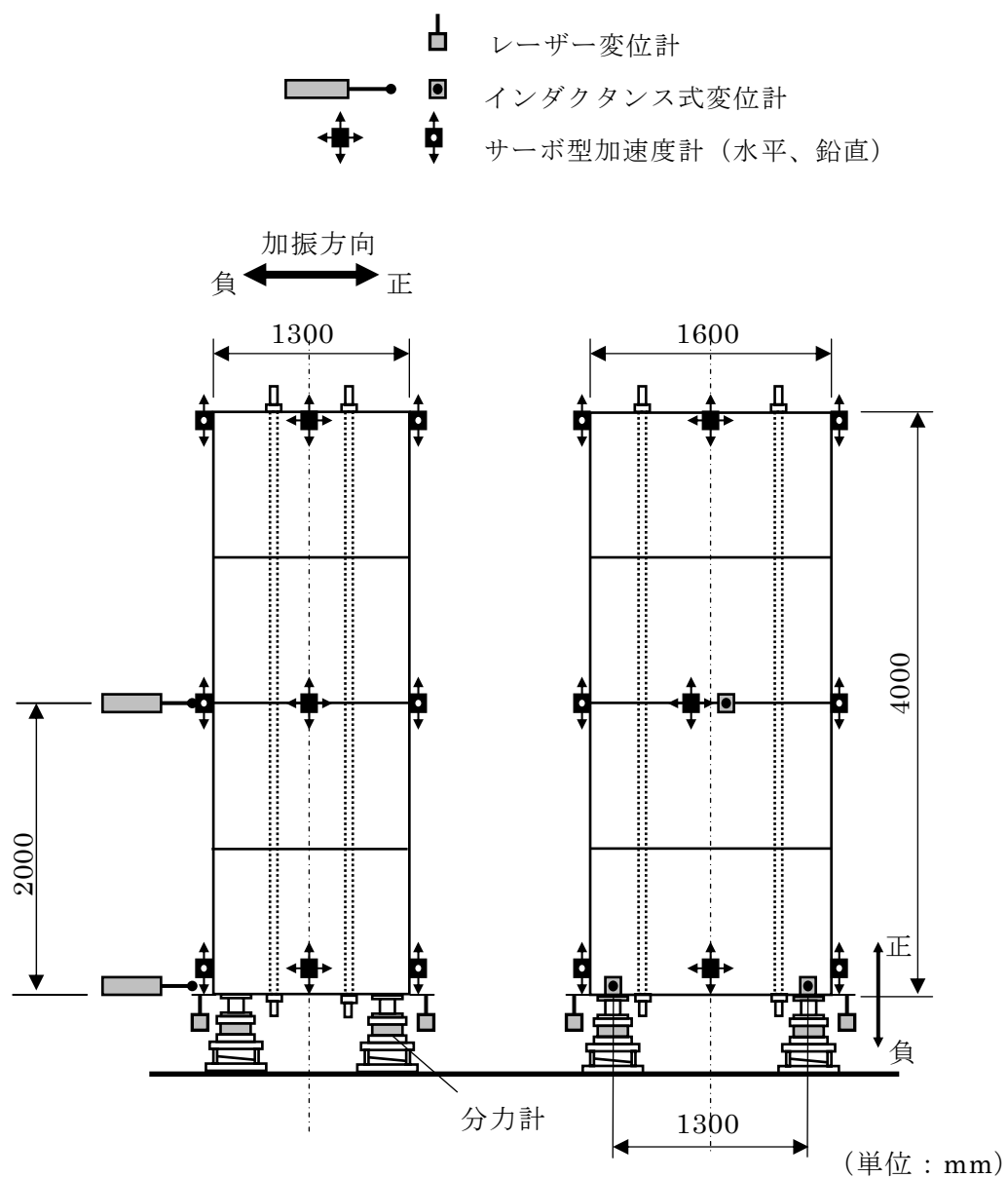


図 2.5 センサーの配置

2.5 実験結果

2.5.1 データ整理方針

一連の実験結果を概観すると、捩れ振動や加振と直交方向の振動はわずかであり、積層ゴムの個体差もほとんど認められなかった。よって、正側の 2 つの積層ゴム同士あるいは負側の 2 つの積層ゴム同士はほとんど同一の荷重・変形挙動を示した。そこで以後、負側の 2 つをまとめて「積層ゴム A」、正側をまとめて「積層ゴム B」と呼ぶことにする。そして、積層ゴム A（あるいは B）の水平力と鉛直荷重として負側（あるいは正側）の 2 つの積層ゴムの荷重の和を、積層ゴム A（あるいは B）の水平変形と鉛直変形として負側（あるいは正側）の 2 つの積層ゴムの変形の平均値を求めた。鉛直変形については、正側の変形を「引張り変形」、負側の変形を「沈み込み変形」と呼ぶこととした。以下に実験結果を項目に分けて詳述する。

2.5.2 入力波の再現性

振動台上で実際に測定された波形と振動台への入力波（縮小原波）の応答スペクトルを比較することにより、振動台上における入力波の再現性を確認した。一例として、図 2.6 に、ケース①の加振レベル $2.5 \times L2$ の時の、振動台上での加速度測定波と縮小原波の擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$) を比較して示す。これより、3 秒以上の周期領域で測定波の擬似速度が低下しているが、3 秒以下ではほとんど一致しており、表 2.6、2.7 に示された試験体の等価固有周期 $0.777 \sim 1.02$ 秒付近でのスペクトル特性が忠実に再現されている。

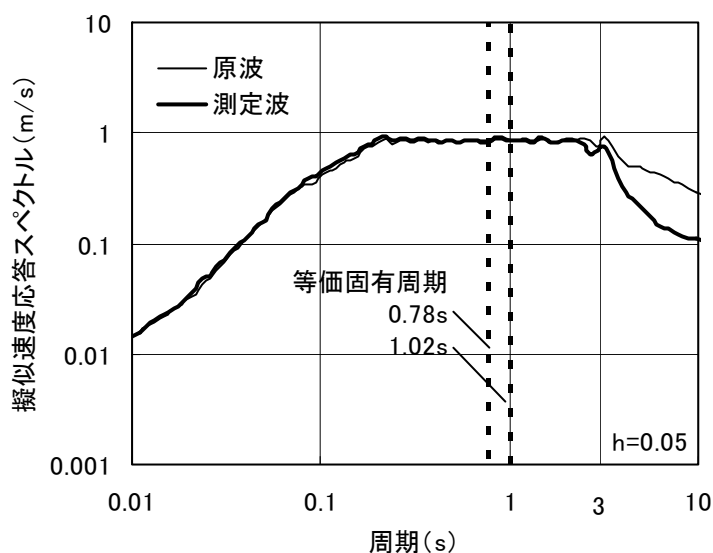


図 2.6 擬似速度応答スペクトルの比較（ケース①、 $2.5 \times L2$ ）

2.5.3 応答最大値

図 2.6、2.7 に、重錘上端水平加速度、重錘重心水平加速度、免震層水平変形、積層ゴム鉛直変形の最大値と加振レベルとの関係を示す。図 2.6 には LRB の全ケース（ケース①～④）を、図 2.7 には HDB の 2 ケース（ケース⑤、⑥）を試験体条件（塔状比及び形状・面圧）の等しい LRB の 2 ケース（ケース①、④）と比較して示す。横軸は加振レベルで、それぞれ終局レベルの 1 つ前の加振レベル（以下、終局直前と称す）までプロットしている。なお、積層ゴム鉛直変形の最大値は、引張り変形を正側に、沈み込み変形を負側にそれぞれ示している。これらの図より以下のことが指摘できる。

重錘上端水平加速度：ケース①を除く全てのケースにおいて、重錘上端加速度が $1.5 \times L2 \sim 2.5 \times L2$ で急激に増加している。これは積層ゴムに引張り変形が生じて重錘が浮き上がり、再び着地した際に生じる衝撃によるものである。ケース②、④、⑤、⑥では、それ以降加振レベルに対する加速度の増加率が大きくなり、加速度は重心のそれと比べて極めて大きくなる。なお、ケース⑥の $1.5 \times L2$ がやや突出していることを除けば、加振レベルに対する加速度の増加率は、ケースによらず概ね同程度である。なお、重錘の浮き上がりと重錘上端加速度の関係については 2.5.5 項において述べる。

重錘重心水平加速度：ケース①、③では、加振レベルに対して加速度は増加するが、 $2.0 \times L2$ において 2m/s^2 程度で頭打ちとなる。これは、2.5.6 項で述べるように免震層水平力－水平変形曲線において水平力が頭打ちとなったことに起因する。その他のケースでは、加振レベルに対して加速度は滑らかに増加する傾向にある。重錘上端に見られた加速度が急増する加振レベルは認められず、重心には着地に伴う大きな加速度が生じない。LRB について比較すると、ケース①、③の方がケース②、④よりも加速度が小さい。これは、ケース①、③の方が積層ゴムの直径が小さく水平剛性が小さいため、周期がより長くなっているためである。積層ゴム直径が等しい LRB の比較では、塔状比の大きい方が加速度が小さい。ただし、直径 90mm のケース①、③の加速度の差は僅かである。試験体条件の等しい LRB と HDB の比較では、HDB のケース⑤、⑥の方が LRB のケース①、④よりも加速度が大きい。これは、HDB の方が周期が短く（表 2.6、2.7 参照）、さらに 2.5.6 項で述べるように HDB で免震層水平力にハードニングが生じていたためである。

免震層水平変形：免震層水平変形は加振レベルの増大に伴いほぼ線形的に増大しており、重錘に生じた浮き上がりにはほとんど無関係である。また、終局直前の水平変形は、各ケースの直径相当の変形を概ね下回っている。LRB について比較すると、ケース①、③の方がケース②、④よりも水平変形が大きい。これは、上記と同様にケース

①、③の方がより長周期となっていることによる。積層ゴム直径が等しいケースの比較では、塔状比の大きい方が水平変形が小さい。ただし、直径 90mm のケース①、③の水平変形の差は小さい。また、試験体条件の等しい LRB と HDB の比較では、HDBの方が LRB よりも変形が僅かに小さい。これも上記と同様に HDBの方がより短周期となっているためである。

積層ゴム鉛直変形：ケース②、④、⑥では、 $1.5 \times L2$ 又は $2.0 \times L2$ で初めて引張り変形が生じ、加振レベルの増大に伴い変形が概ね 2 次曲線的に増加している。塔状比が 6 のケース④、⑥では変形が大きく、終局直前の引張り変形はそれぞれ 44mm 及び 61mm である。ケース③、⑤では $2.0 \times L2$ で引張り変形が初めて生じるが、引張り変形とともに沈み込み変形も生じており、終局直前では両者の変形量はほぼ同程度となる。一方、ケース①では、引張り変形は生じず、沈み込み変形のみが生じている。

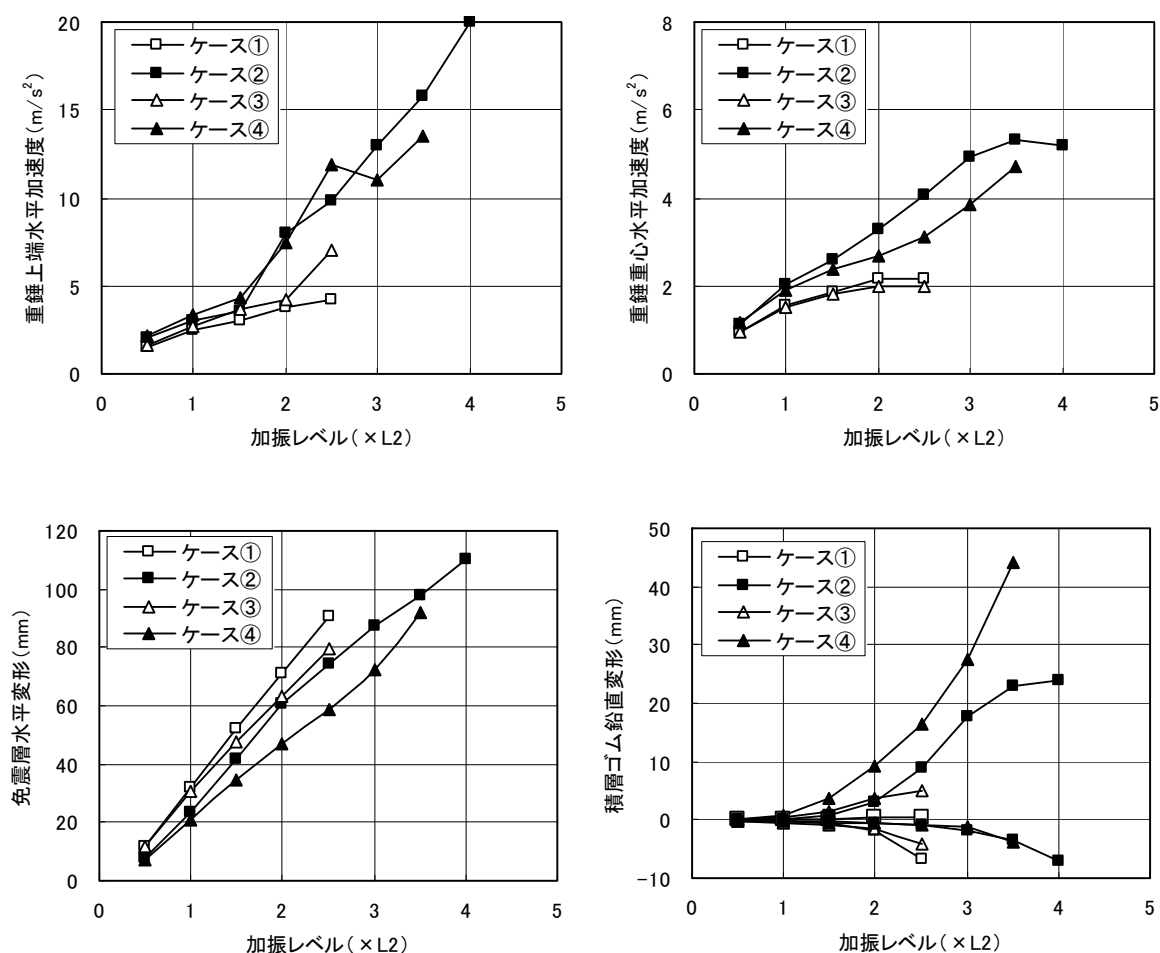


図 2.6 重錘の応答最大値 (LRB)

以下に各ケースの終局直前までの挙動をまとめて示す。

ケース①、③、⑤：ケース①では沈み込み変形のみが生じており、終局直前まで並進的な運動が支配的である。ケース③、⑤では引張り変形が生じるが、変形量は小さく重錘の運動は概ね並進的である。ケース①、③では重錘上端・重心ともに、水平加速度は終局直前まで小さい値に保たれており、免震効果が維持されている。一方、ケース⑤では引張り変形の生起により重錘上端に大きな加速度が生じる。

ケース②、④、⑥：加振レベルの増大に対して、免震層水平変形は線形的に、積層ゴム引張り変形は2次曲線的に増大する。すなわち、加振レベルが大きくなると重錘の併進的な運動と比較してロッキング的な運動が顕著になる。重錘上端水平加速度は、積層ゴムに引張り変形が生じる加振レベル付近を境に急増し始め、終局直前には重心加速度と比較して極めて大きな値となる。

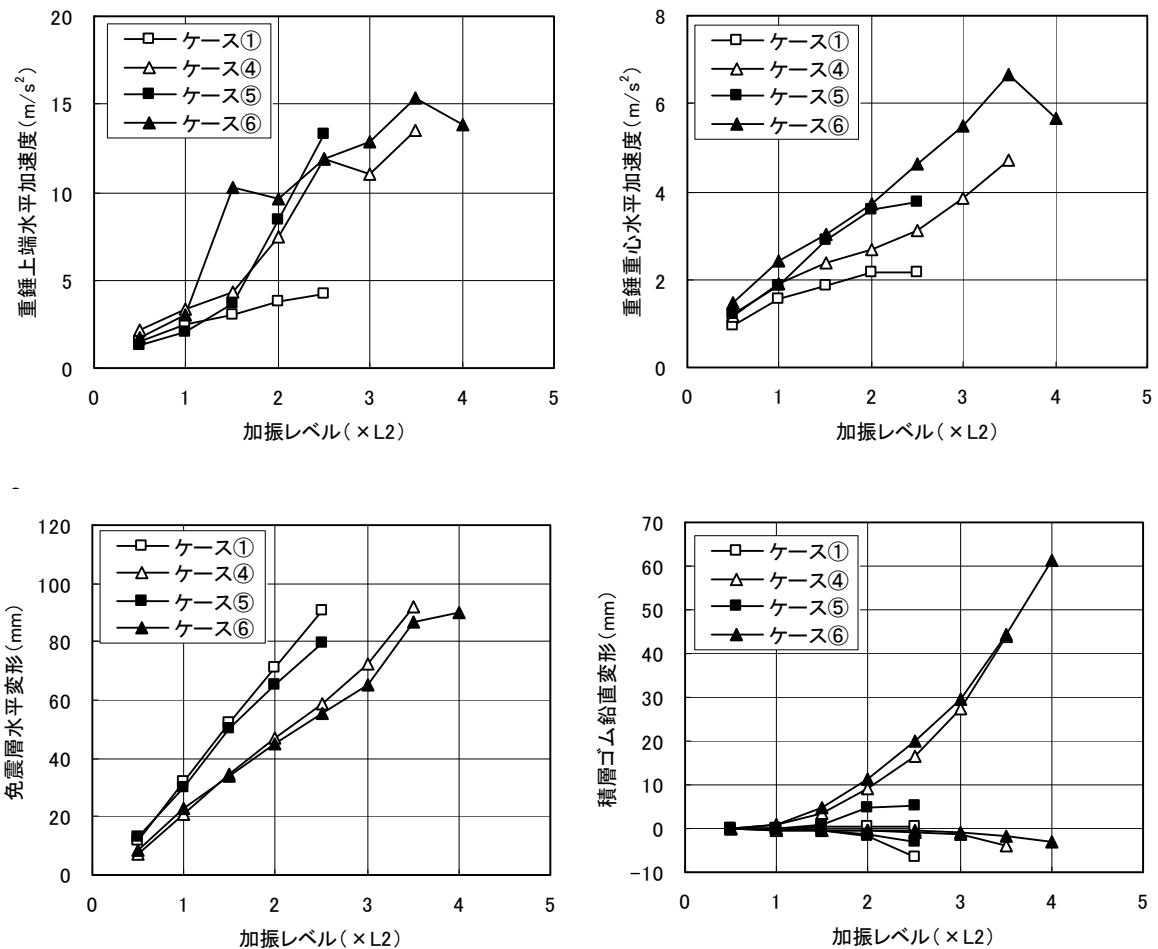


図 2.7 重錘の応答最大値 (HDB と LRB)

2.5.4 積層ゴム破壊時加振レベルと破壊形式

いずれのケースについても、加振レベルの増大に伴い積層ゴムに過大な水平変形と引張り変形又は沈み込み変形が生じ、積層ゴムの破壊により終局に至った。表 2.8 に、積層ゴム破壊時における加振レベルと積層ゴムの破壊形式を示す。また、各ケースの破壊状況を以下に記す。

ケース①：水平変形が積層ゴムの直径相当の変形を超え重錘全体が沈み込み、積層ゴム A に大きな沈み込み変形を伴う座屈破壊が生じ、ほぼ同時に積層ゴム B にも座屈破壊が生じた。

ケース②：水平変形が積層ゴムの直径にほぼ相当する変形に達したが、重錘が浮き上がり、積層ゴム B に引張り破断が生じた。

ケース③、⑤：重錘が僅かに浮き上がり積層ゴム B には引張り変形が生じたが、水平変形が積層ゴムの直径に相当する変形を超えて重錘の積層ゴム A 側が沈み込み、積層ゴム A に座屈破壊が生じ、ほぼ同時に積層ゴム B にも座屈破壊が生じた。

ケース④、⑥：水平変形は積層ゴムの直径相当の変形で留まるが、重錘が頻繁に浮き上がり、両方の積層ゴムに引張り変形が生じた。最後は積層ゴム B 側が大きく浮き上がって着地した後、積層ゴム A 側が浮き上がり引張り破断が生じた。

表 2.8 積層ゴム破壊時加振レベルと破壊形式

ケース	①	②	③	④	⑤	⑥
加振レベル (最大加速度[m/s ²])	3.0×L2 (10.68)	4.5×L2 (16.02)	3.0×L2 (10.68)	4.0×L2 (14.24)	3.0×L2 (10.68)	4.5×L2 (16.02)
積層ゴム A	座屈 破壊	—	座屈 破壊	引張り 破断	座屈 破壊	引張り 破断
積層ゴム B	座屈 破壊	引張り 破断	座屈 破壊	—	座屈 破壊	—

2.5.5 大入力時の運動パターン

時刻歴波形によって大入力時における重錘の詳細な運動パターンを調べた。図 2.8～2.10 に、大変形が生じた加振レベル $2.5 \times L2$ （最大加速度： 8.90m/s^2 ）について、積層ゴム A、B の鉛直変形、重錘重心水平変位と免震層水平変形、免震層回転角、重錘の重心・上端・下端の水平加速度、重錘の重心鉛直加速度、積層ゴム A、B の鉛直荷重の時刻歴波形を示す。時刻は最も大きな変形が生じた 15～17 秒である。これより、以下のことが指摘できる。

ケース①：積層ゴム A に大きな沈み込み変形が生じているが、積層ゴム B にも沈み込み変形が生じている。一方、免震層水平変形と重心水平変位の差異は僅かであり、免震層回転角も他ケースと比較して小さい。よって、重錘の運動は、若干下方へ沈み込みながらも概ね並進的である。なお、免震層回転角は 0.005rad 程度であり、積層ゴム A、B ともに水平変形下において上端部に 0.005rad の回転変形が生じている。水平加速度及び重心鉛直加速度は他のケースと比較して穏やかな波形となっている。鉛直荷重は、沈み込み変形の最大値が生じる時刻に対応して、積層ゴム A では静止時荷重のほぼ 2 倍程度、積層ゴム B では概ねゼロとなるが、他ケースと比べて変動は小さい。

ケース②：積層ゴム A に僅かな沈み込み変形と、積層ゴム B に大きな引張り変形が生じている。引張り変形が生じている間、免震層水平変形は増加せず重心水平変位よりも小さくなっている。よって、重錘の運動は、積層ゴム A を支点として積層ゴム B 側が浮上するロッキング的な運動である。また、免震層回転角は 0.01rad 程度であり、引張り変形の生起によりケース①よりも大きい回転角が生じている。上端・下端水平加速度及び重心鉛直加速度には、引張り変形が収まった時刻(16s 付近)すなわち重錘が着地した時刻に衝撃的な加速度が生じ、その後自由振動する波形が認められる。一方、重心水平加速度にはそのような衝撃的な加速度が生じていない。これについては、上端と下端の水平加速度が重心加速度に対して位相を 180 度反転させた波形となっていることから、重錘のロッキング振動の中心が重心位置に一致しているためと考えられる。これは以下の全てケースについても同様である。鉛直荷重は、引張り変形が生じている間、積層ゴム B には引張り荷重が生じるが、積層ゴム A では静止時荷重の 2 倍を超える圧縮荷重となる。また、重錘の着地により両積層ゴムの鉛直荷重が大きく変動し、その変動量は最大で静止時荷重の 2 倍を超える。

ケース③：積層ゴム A に沈み込み変形が、積層ゴム B に引張り変形が生じているが、鉛直変位の平均値はゼロ近傍の値で推移している。また、引張り変形が生じている間、免震層水平変形は増加せず重心水平変位よりも小さくなっている。よって、重錘の運動は、重錘下端中央部を支点としたロッキング的な運動である。引張り変形はケース

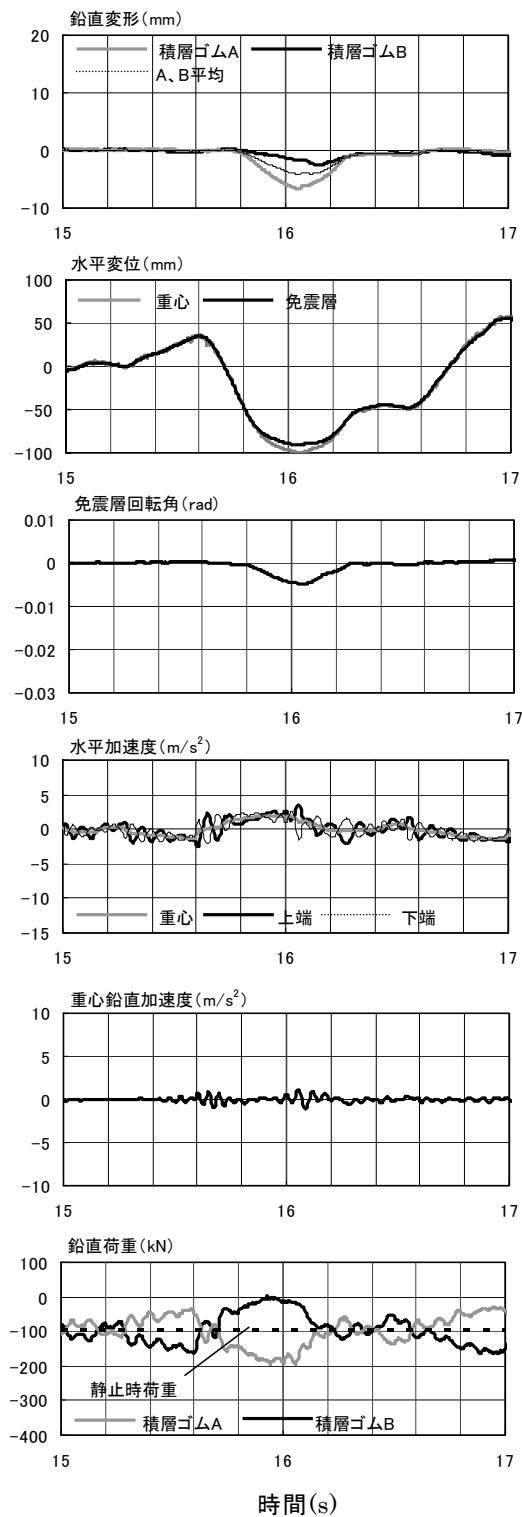
②と比較して小さいが、沈み込み変形が生じているため免震層にはケース②よりも大きい回転角 0.012rad が生じている。着地時に上端・下端水平加速度及び重心鉛直加速度がやや大きくなっているが、ケース②、④と比べれば小さい。鉛直荷重の性状はケース②とほぼ同様である。

ケース④：積層ゴム A に僅かな沈み込み変形と、積層ゴム B に大きな引張り変形が生じている。LRB を使用したケースの中では最も大きな引張り変形及び免震層回転角が生じたケースである。免震層回転角は 0.02rad を越えており、積層ゴム上端部には大きな回転変形が生じている。引張り変形が生じている間、免震層水平変形は増加せず重心水平変位よりも小さくなっているのはケース②、③と同様であるが、免震層水平変形は最も小さく抑えられている。重錘の運動はケース②と同じく積層ゴム A を支点として積層ゴム B 側が浮上するロッキング的な運動であるが、積層ゴム B 側での着地と同時に積層ゴム A に引張り変形が生じており、ロッキング的な運動が連続して現れている。このため、上端・下端水平加速度及び重心鉛直加速度には、重錘の着地に伴う衝撃的な加速度が数回認められる。また、重錘の着地により、最大で静止時荷重の 4 倍に相当する鉛直荷重が生じている。

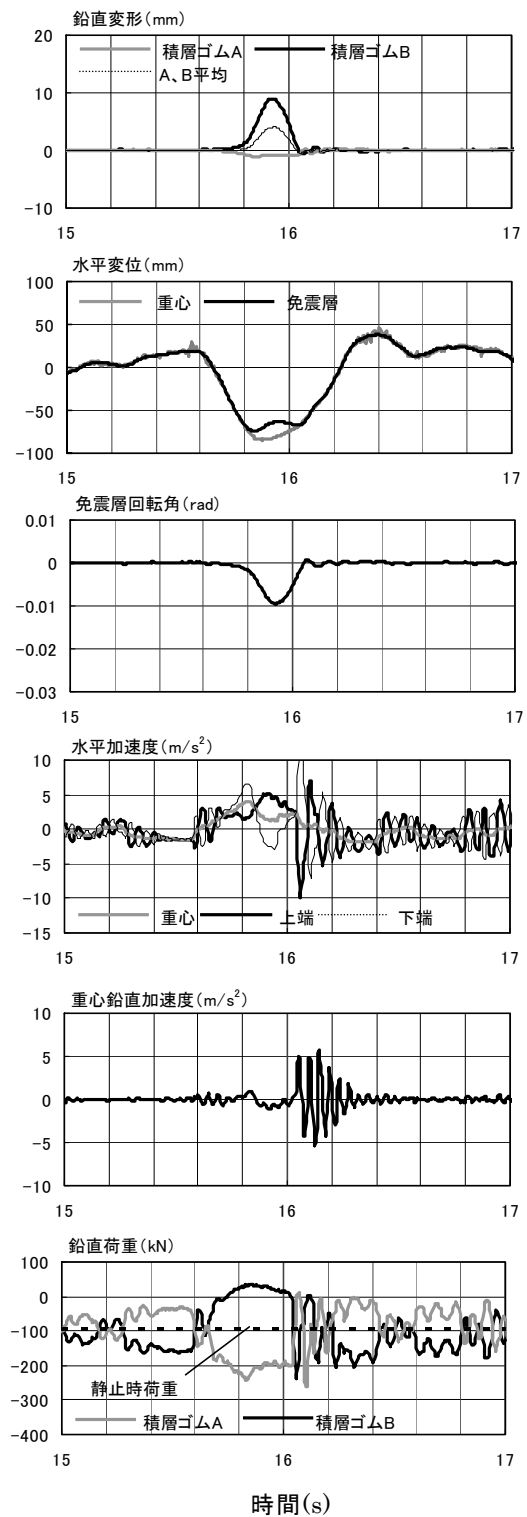
ケース⑤：本ケースの塔状比及び積層ゴム形状・面圧はケース①と同じであるが、積層ゴムの条件のみが等しいケース③とほぼ同様の性状を示している。積層ゴム A の沈み込み変形と積層ゴム B の引張り変形はケース③とほぼ同程度であるが、免震層回転角は 0.008rad でケース③よりも小さい。これはケース⑤の方が塔状比が小さいためである。重錘の運動は重錘下端中央部を支点としたロッキング的な運動である。

ケース⑥：全ケースの中で最も大きな引張り変形と免震層回転角が生じたケースである。基本的な性状については、塔状比及び積層ゴム形状・面圧が等しい LRB のケース④とほぼ同様であり、重錘の運動はケース②、④と同じく積層ゴム A を支点として積層ゴム B 側が浮上するロッキング的な運動である。

以上より、大入力時における重錘の運動パターンは、積層ゴムの沈み込み変形によって重錘全体が沈み込んだケース①の沈み込み型、積層ゴムの引張り変形によって重錘が回転し浮き上がったケース②、④、⑥の浮き上がり型、積層ゴムの沈み込み変形と浮き上がり変形が同時に生じたケース③、⑤の混在型に分類することができる。図 2.11 に運動パターンの概略を示す。

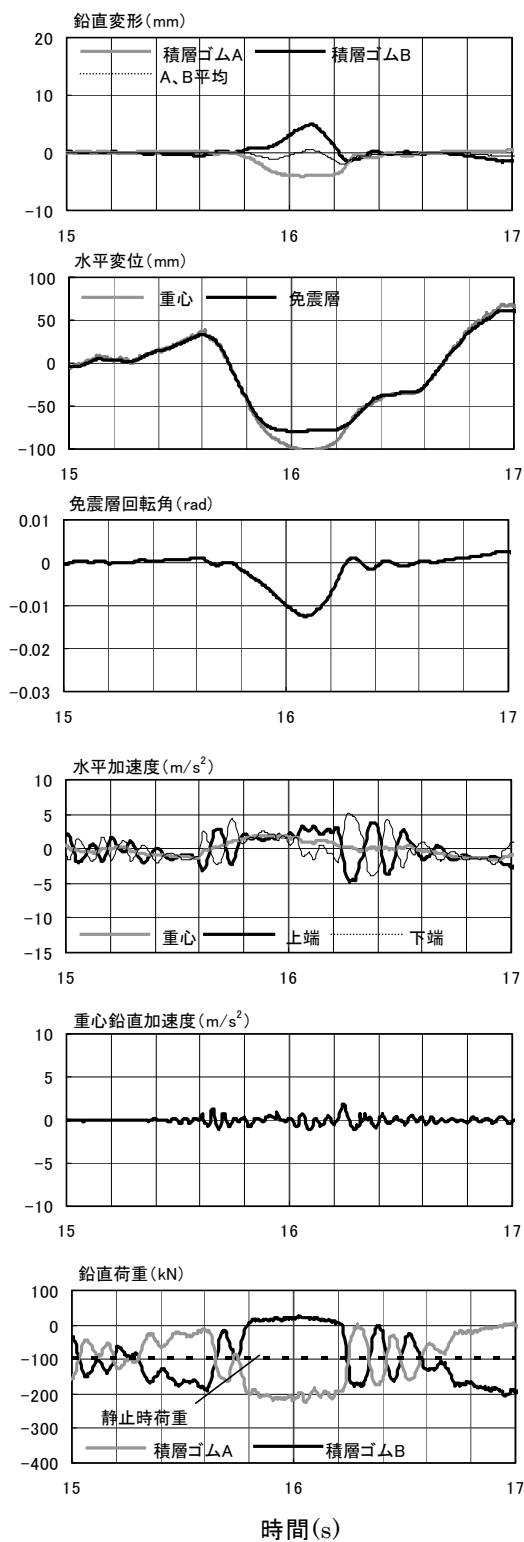


ケース①

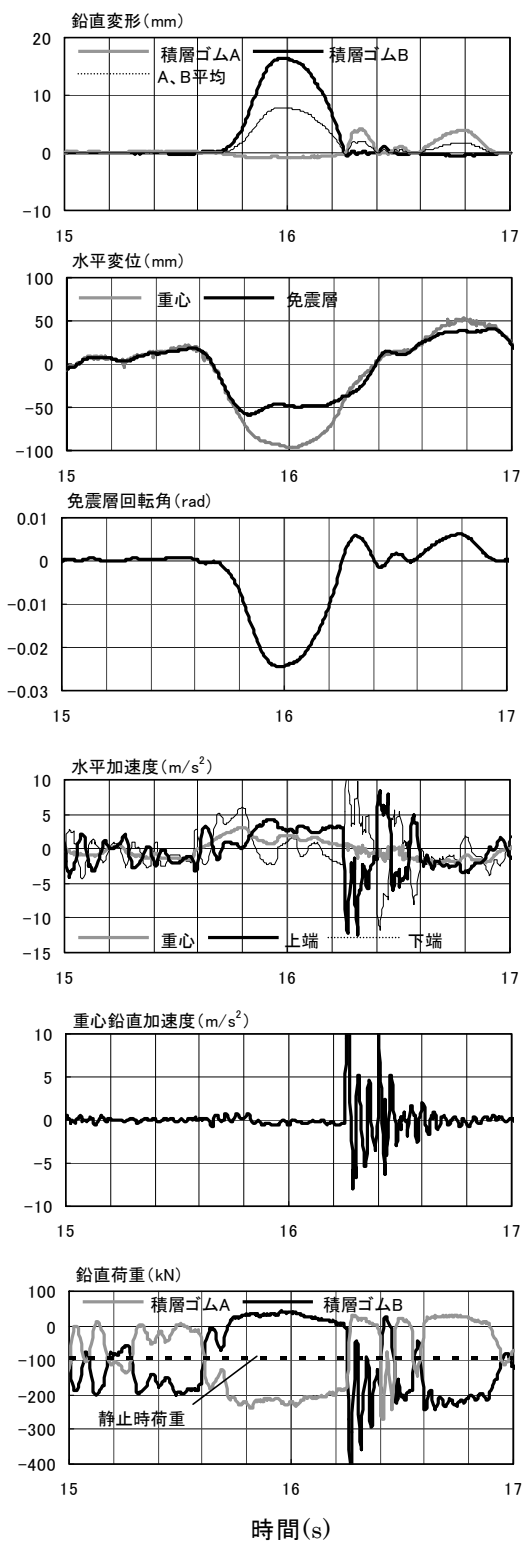


ケース②

図 2.8 大入力時の運動パターン：時刻歴波形の比較（加振レベル $2.5 \times L2$ ）

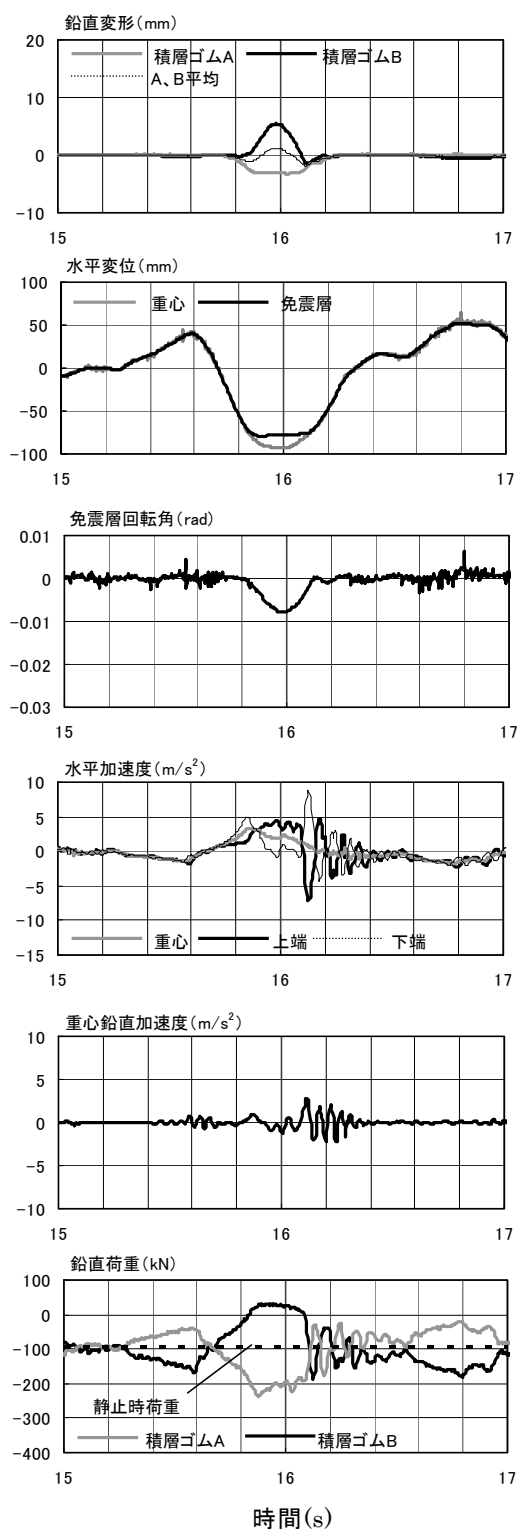


ケース③

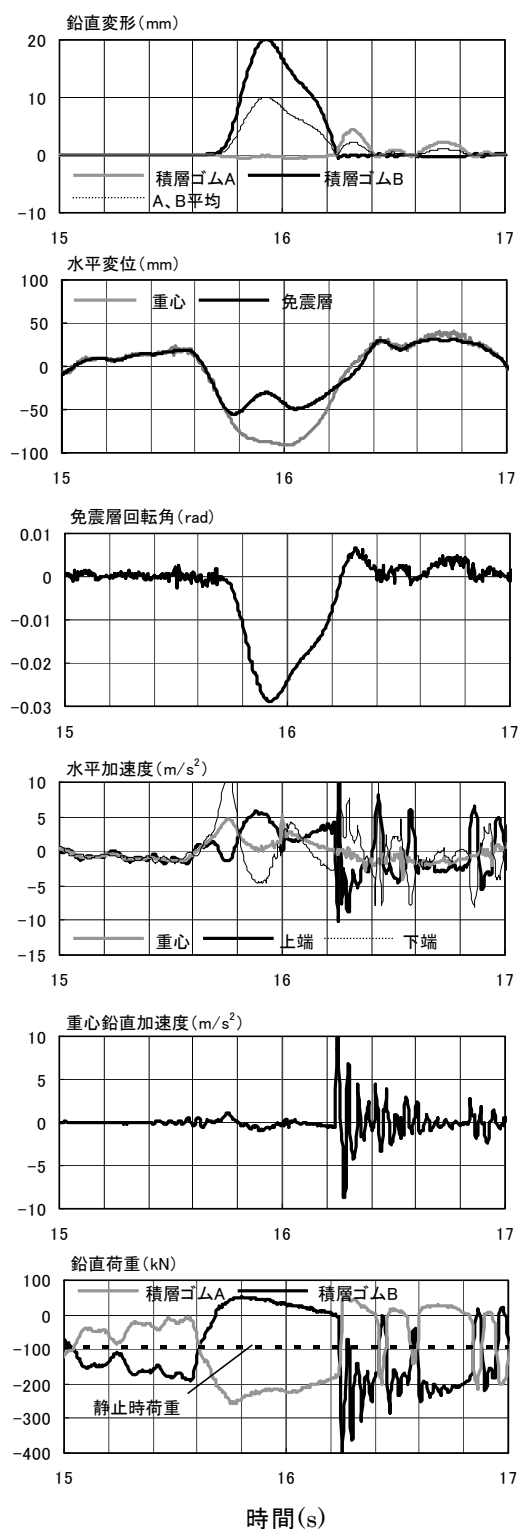


ケース④

図 2.9 大入力時の運動パターン：時刻歴波形の比較（加振レベル $2.5 \times L2$ ）



ケース⑤



ケース⑥

図 2.10 大入力時の運動パターン：時刻歴波形の比較（加振レベル $2.5 \times L2$ ）

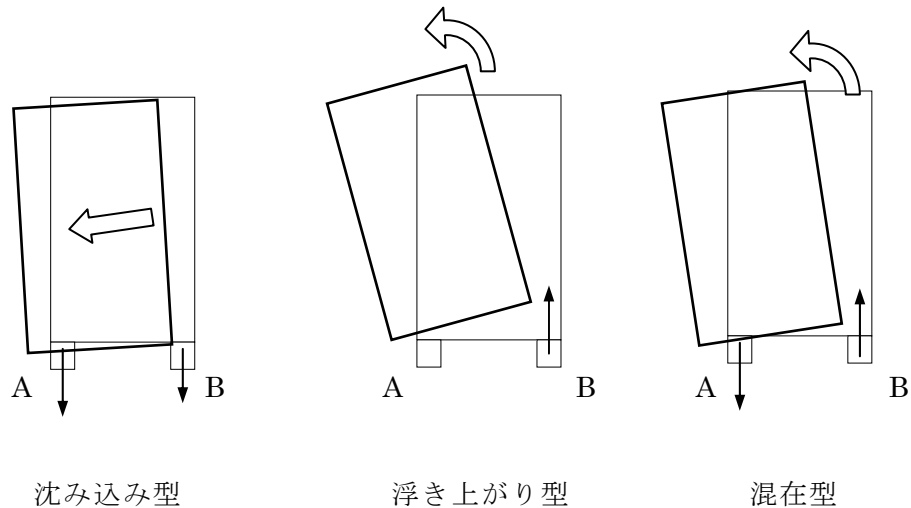


図 2.11 重錘の運動状態の概略

2.5.6 大入力時の運動パターンを支配する要因

前記の 3 つの運動パターンを決定づける要因として、免震層の水平復元力特性と剛体の静的浮き上がり限界水平力に着目した。前者は実験要因である積層ゴムの形状・面圧に、また、これから述べるように後者は塔状比 H/B に関連している。剛体の静的浮き上がり限界水平力とは、水平面上に置いた剛な直方体の重心に水平力を静的に作用させ、直方体が圧縮端を回転中心にして浮き上がり始め、反力がゼロとなった瞬間の水平力である。モーメントの釣り合いから、剛体の静的浮き上がり限界水平力 Q_{up} は次式で定義される。

$$Q_{up} = \frac{W}{(H/B)} \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで、 W は直方体の重量である。本試験体 ($W=192\text{kN}$) について Q_{up} を計算すると、 $H/B=4$ のとき $Q_{up}=48\text{kN}$ 、 $H/B=6$ のとき $Q_{up}=32\text{kN}$ である。図 2.12 に、各ケースの免震層水平力 (Q_h) - 水平変形 (δh) 曲線を示す。加振レベルは $2.5 \times L2$ であり、図中には Q_{up} を示している。これらの図より、以下のことが指摘できる。

沈み込み型 (ケース①)：最大水平変形は 91mm であり、積層ゴム直径 90mm に対して 100% を超えている。また、水平変形が 80mm 付近で水平力が頭打ちとなり、水平力は常に Q_{up} 以下である。

混在型 (ケース③、⑤)：両ケースともに最大水平変形は 80mm であり、積層ゴム直径 90mm に対して 90% 程度に達している。ケース③では、 $Q_h - \delta h$ 曲線の形状がケース①とほぼ同様であるが、 H/B が 6 で Q_{up} がケース①よりも小さいため、水平力が Q_{up} を上回っている部分がある。一方、ケース⑤では、水平変形が小さい領域 ($\delta h <$

40mm 程度) ではケース①、③と降伏後の水平剛性が概ね同程度であるが、大変形時に水平力にハードニングが生じているため水平力が Q_{up} を上回っている。図 2.13 に、ケース③について水平力と積層ゴム B の鉛直変形の時刻歴波形を示す。これより、2.5 秒、4.7 秒、6.2 秒付近で水平力が Q_{up} を超えているが、これらの時刻が積層ゴム B で引張り変形が生じた時刻にほぼ対応している。

浮き上がり型 (ケース②、④、⑥) : ケース①、③及び⑤と比較して水平剛性と水平力の最大値が大きくなっているのは、ケース②、④及び⑥の方が積層ゴム直径が大きく、面圧も低いためである。最大水平変形はそれぞれ 74mm、60mm、55mm であり、積層ゴム直径 110mm に対してそれぞれ 67%、55%、50%に抑えられている。全ケースについて水平力が Q_{up} を上回っている部分が認められる。 H/B が 4 のケース②では、負側最大変形時の 1 サイクルにおいて水平力が Q_{up} を超えている。一方、ケース④、⑥では、 H/B が 6 で Q_{up} がケース②より小さいため、正負の変形時に水平力が頻繁に Q_{up} を超えている。特にケース⑥では、水平力のハードニングが顕著であり Q_{up} を大きく上回っている。図 2.13 にケース④の水平力と積層ゴム B の鉛直変形の時刻歴波形を示す。これより、ケース③と同様、水平力が Q_{up} を超えた時刻が積層ゴム B で引張り変形が生じた時刻にほぼ対応している。

以上より、重錘の運動パターンは剛体の静的浮き上がり限界水平力 Q_{up} と免震層水平力 Q_h の大小関係に支配されており、 $Q_{up} < Q_h$ の場合には基本的に浮き上がり型となり、 $Q_{up} > Q_h$ の場合には沈み込み型となる。一方、沈み込み変形は免震層水平変形が積層ゴムの直径に相当する変形に近づくほど増加する。よって、 $Q_{up} < Q_h$ で引張り変形が生じていても、水平変形が直径相当の変形に近づくると沈み込み変形が生じる可能性が高くなり、混在型に分類されることになる。

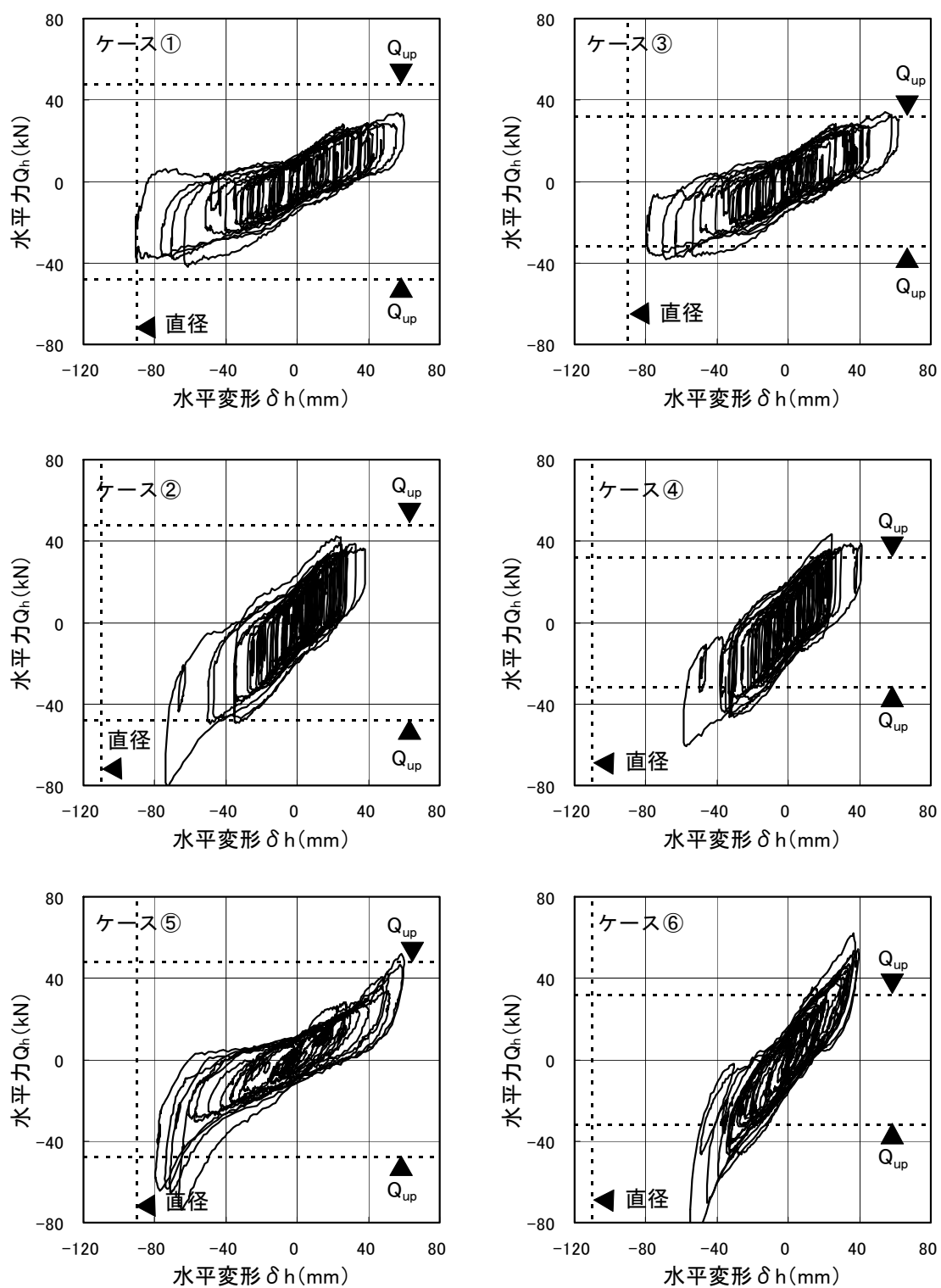
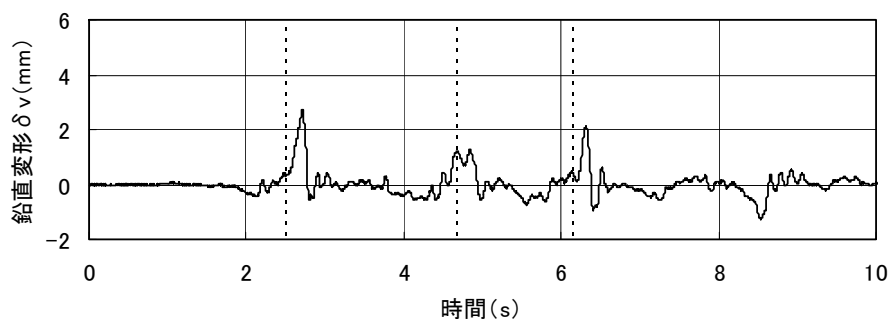
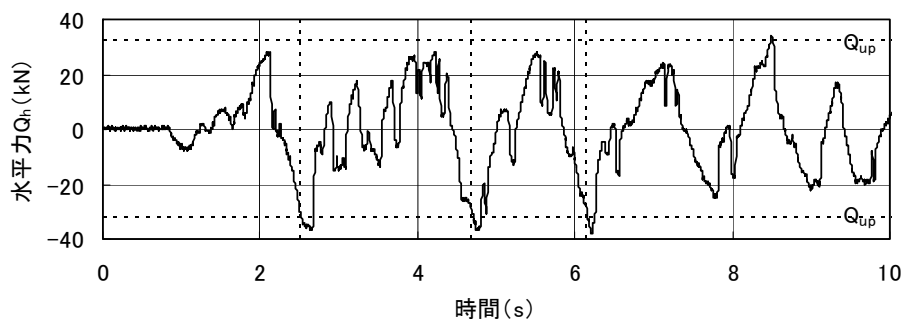
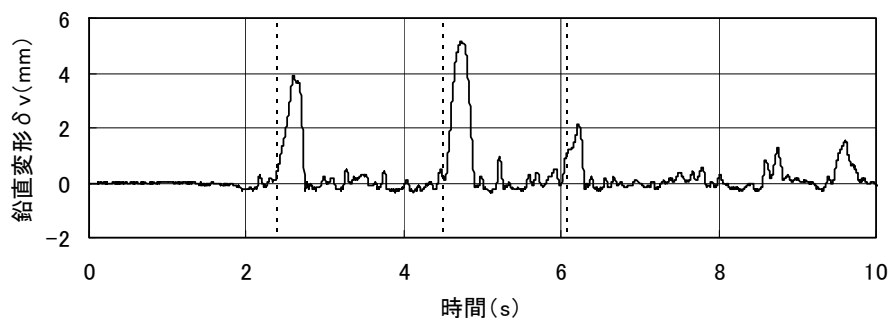
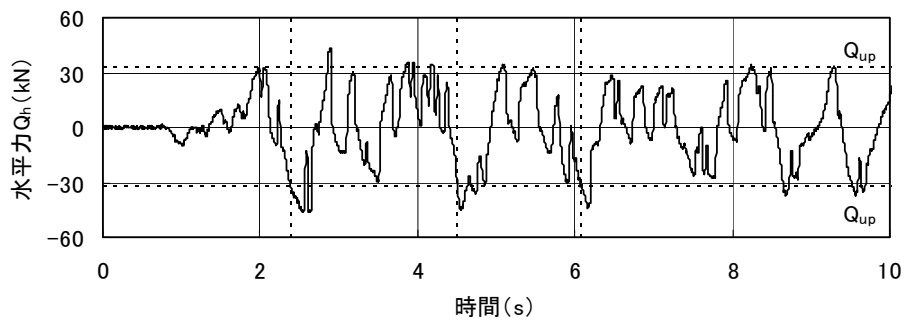


図 2.12 免震層水平力(Q_h)—水平変形(δh)曲線



ケース③



ケース④

図 2.13 水平力と鉛直変形の時刻歴波形

2.5.7 大入力時の積層ゴムの挙動

沈み込み型と浮き上がり型の大入力時における積層ゴムの挙動を明らかにするため、両タイプを代表してケース①とケース②の各種履歴特性を詳細に分析した。図 2.14、2.15 に、加振レベル $2.5 \times L2$ における、各積層ゴムの水平力 (Q) - 水平変形 (δh) 曲線、鉛直変形 (δv) - δh 曲線、鉛直荷重 (P) - δh 曲線、 P - δv 曲線を示す。図中の a 点及び b 点の記号は各ループ上の同時刻の地点を表す。これより、以下のことが指摘できる。

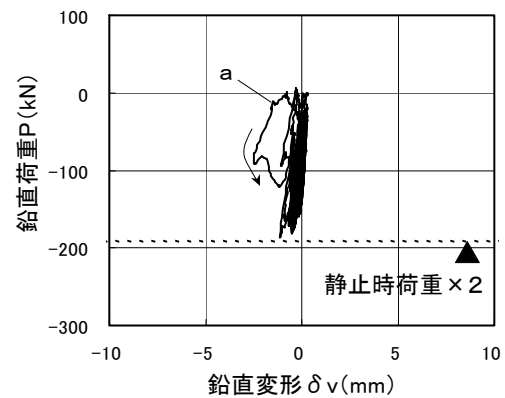
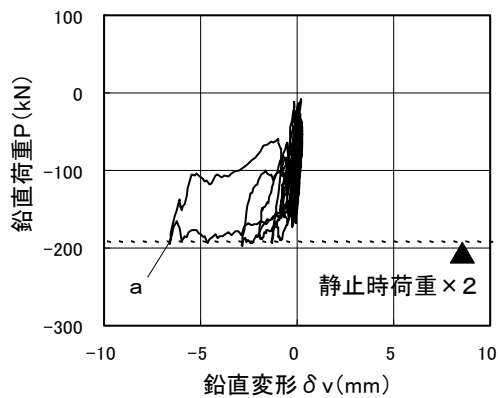
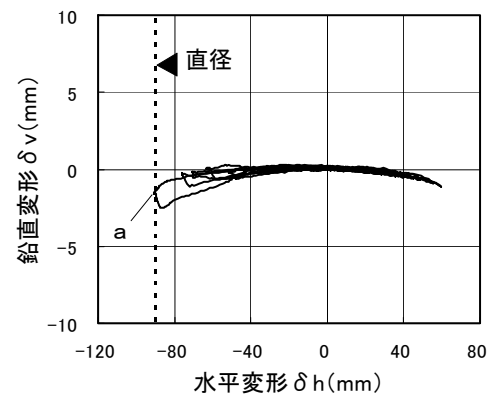
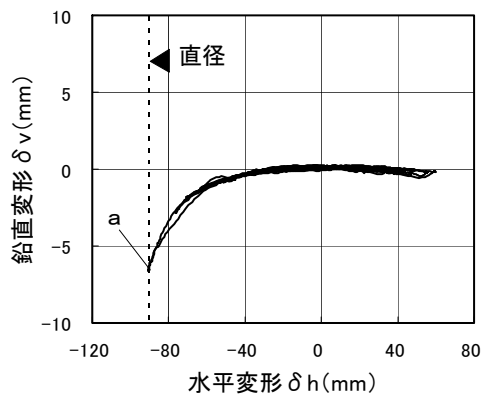
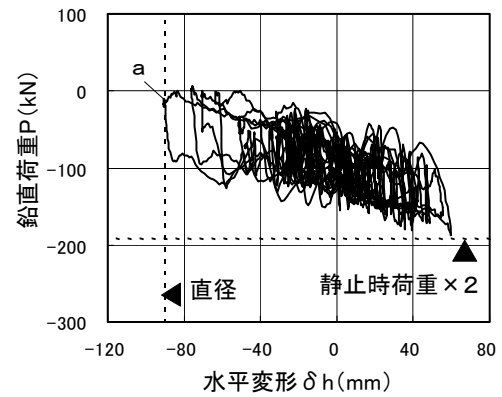
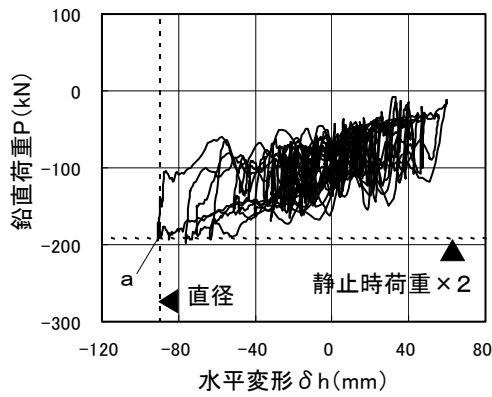
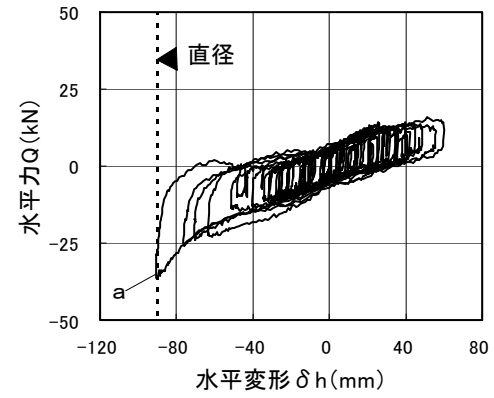
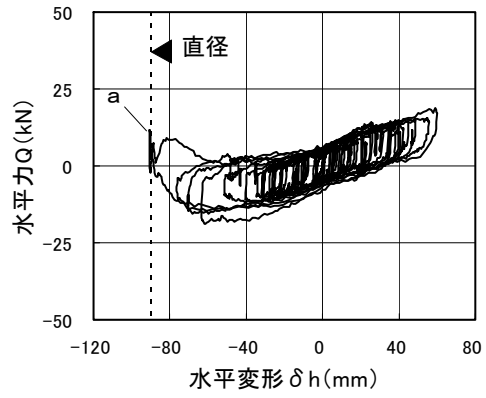
ケース①: 負側の最大水平変形は -91mm (せん断ひずみ γ =水平変形/ゴム総厚=414%) である。積層ゴムの直径は 90mm であるので、上下の端面がちょうどずれたような状況になっている。 Q - δh 曲線より、積層ゴム A では、水平変形が -60mm (γ =270%) 付近で水平力が頭打ちとなり負勾配が発生するが、その後も水平力が最小となる a 点まで変形が進む。よって、負勾配発生点に対して、概ね 1.5 倍程度の水平変形能力を有していることになる。一方、積層ゴム B では、水平力は若干のハードニングを伴い a 点にて最大となる。 Q - δh 曲線における差異は、それぞれの積層ゴムに生じる鉛直荷重の違いによる。 P - δh 曲線によれば、a 点付近において積層ゴム A に静止時荷重のほぼ 2 倍程度が生じているのに対し、積層ゴム B はほぼ無負荷の状態となっている。また、 δv - δh 曲線より、沈み込み変形は水平変形の増大に伴い大きくなる。鉛直荷重が大きいほど沈み込み変形は大きくなる傾向にあり、積層ゴム A では a 点において最大の沈み込み変形 6.6mm (鉛直ひずみ ϵ =鉛直変形/ゴム総厚=30%) が生じている。 P - δv 曲線より、積層ゴム A では、a 点に向かうループにおいて鉛直剛性が低下し、その後大きな履歴ループを描いている。一方、積層ゴム B では、a 点前後において小さな履歴ループを描くが、ここではループの向きは図中矢印に示す左回りである。このような P - δv 曲線の複雑さは、鉛直沈み込みの挙動が鉛直荷重だけでなく水平変形にも依存するためである。

本ケースでは相対的に直径の小さい積層ゴムを比較的高い面圧で使用している。よって、直径に近い水平変形下では、積層ゴムの水平力が水平変形だけでなく鉛直荷重にも、鉛直変形が鉛直荷重だけでなく水平変形にもそれぞれ影響を受け、複雑な挙動を示す。また、これらの依存性は、定性的には既往の積層ゴム単体の圧縮せん断試験と一致する結果となっている。一方、図 2.12 のケース①の免震層 Q_h - δh には負勾配やハードニングは認められず、免震層全体の復元力特性に、個々の積層ゴムの不安定な特性が与える影響は小さい。

ケース②: 負側の最大水平変形は -74mm (γ =340%) である。積層ゴムの直径は 110mm であるので、水平変形は直径の 67%に相当する。 Q - δh 曲線については、両積層ゴム

に大きな違いは認められず、概ねバイリニアで表される安定した履歴ループを描いている。 $P-\delta h$ 曲線によると、積層ゴム A では a 点において静止時荷重の 2 倍を超える鉛直荷重が生じ、積層ゴム B の b 点付近では概ね降伏荷重に達している。また、鉛直荷重の変動量が静止時荷重の 2 倍を超える部分も認められる。しかし、 $Q-\delta h$ 曲線にはそのような荷重変動の影響がほとんど現れていない。一方、 $\delta v-\delta h$ 曲線によると、沈み込み変形の水平変形依存性は小さく、鉛直荷重の変動に対応して、積層ゴム A の a 点では 1.0mm ($\varepsilon=5\%$) 程度の沈み込み変形が生じている。また、積層ゴム B の b 点では 8.9mm ($\varepsilon=40\%$) の引張り変形が生じている。 $P-\delta v$ 曲線より、積層ゴム A では高い剛性を持った弾性的な挙動を示しているのに対し、積層ゴム B では圧縮域から引張り降伏までは高い剛性を保ち、引張り降伏以降は塑性流れを起こす弾塑性的な性状を示している。

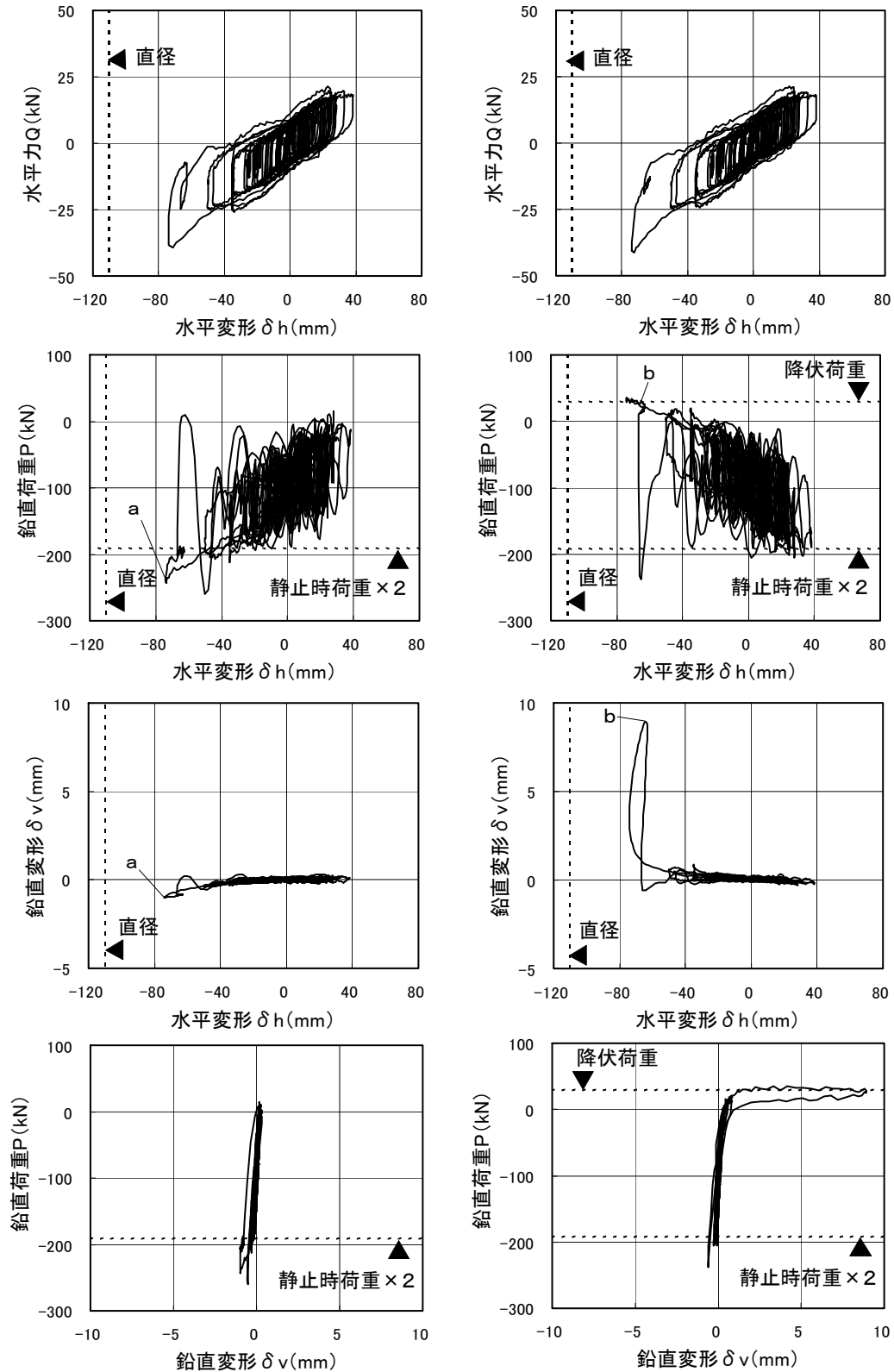
本ケースでは相対的に直径の大きな積層ゴムを比較的低い面圧で使用している。また、水平変形は積層ゴム直径の 2/3 程度の大きさであった。このため、水平特性は鉛直荷重の比較的大きな変動に対しても安定し、鉛直変形は水平変形の影響を受けにくい結果となった。すなわち、水平力は主として水平変形だけに、鉛直変形は主として鉛直荷重だけに依存する単純な性状を示す。



積層ゴム A

積層ゴム B

図 2.14 沈み込み型の履歴曲線 (ケース①、2.5×L2)



積層ゴム A

積層ゴム B

図 2.15 浮き上がり型の履歴曲線 (ケース②、 $2.5 \times L2$)

2.5.8 積層ゴム破壊時の詳細挙動

全ケースについて、積層ゴムの破壊が生じた破壊時加振レベル（表 2.8 参照）における挙動を分析した。図 2.16～2.21 に、各ケースについて積層ゴム A 及び B の水平力（ Q ）－水平変形（ δh ）曲線と鉛直変形（ δv ）－ δh 曲線を示す。また、写真 2.3～2.8 に、積層ゴムの破壊前及び破壊時における変形状態について、振動台上に固定したビデオカメラの記録映像からのキャプチャー画像を示す。履歴曲線中のアルファベット記号は同記号の写真に対応している。これらの図、写真より、以下のことが指摘できる。

ケース①：積層ゴム A では水平変形が-40mm 付近で水平力が頭打ちとなり負勾配が生じ始め、-80mm 付近で負勾配がさらに急となる。また、-80mm を超えると沈み込み変形が急増している。a 点では、水平変形が直径相当の変形を大きく超えた-104mm（ $\gamma=473\%$ ）となる。積層ゴム A では、沈み込み変形がゴム総厚の半分を超える 14mm（ $\epsilon=64\%$ ）に達し、水平力が大きく低下している。a 点において、積層ゴム A は重錘の全重量を支持しており、その形状はせん断に加えて曲げの変形モードが顕著となっている。積層ゴム B では、直径相当の変形までは僅かにハードニングが認められるが、それを超えるとハードニングがさらに強くなる。静止時よりも鉛直荷重が小さいため、積層ゴム A と比べて沈み込み変形は小さい。積層ゴム B の形状は積層ゴム A と比較してせん断の変形モードが卓越していると言える。b 点では、積層ゴム A の沈み込み変形が減少し、逆に積層ゴム B の沈み込み変形が増加している。これは、写真 b から分かるように重錘にロッキング的な運動が生じたためである。この結果、積層ゴム A では鉛直荷重の減少により水平力が急増し、積層ゴム B では鉛直荷重の増加により水平力が急激に低下し、その形状には曲げの変形モードが表れている。b 点以降は、重錘のロッキング的な運動により鉛直荷重が変動し（写真 c）、水平変形と沈み込み変形が徐々に増大した。最終的には、写真 d に示すように、重錘の並進的な運動に伴い両積層ゴムにほぼ同時に座屈破壊が生じた。

ケース②：a 点では、水平変形が-70mm で積層ゴム B に引張り変形 28mm（ $\epsilon=127\%$ ）が生じている。b 点では、水平変形が-95mm で、積層ゴム B に引張り変形 27mm が、積層ゴム A に沈み込み変形 4mm が生じている。両積層ゴムともに繰り返しの伴う水平力の低下が生じており、さらに、積層ゴム A では水平力の頭打ちが、積層ゴム B には水平力のハードニングが生じている。c 点では、水平変形が直径相当の変形を上回る-120mm（ $\gamma=545\%$ ）となり、積層ゴム A では、水平力が急激に低下し、沈み込み変形も急増して 16mm（ $\epsilon=73\%$ ）となった。d 点では、水平変形がほぼ保たれた状態で積層ゴム B の引張り変形が 14mm（ $\epsilon=64\%$ ）に達した時点で、積層ゴム B のうち、写

真 d に示したゴムとは反対側のゴムに引張り破断が生じた。a 点や b 点と比較して 1/2 程度の小さい引張り変形での破断となったが、これは水平変形が a 点や b 点と比較して大きく、積層ゴムの引張り破断に対する変形能力が低下していたためである^{2.13)}。また、破断直前の積層ゴムの形状は、大きな水平変形下で引張り変形を受けたため、せん断の変形モードの中央部がくびれた形となっている。

ケース③：a 点では、水平変形が -70mm 付近で、積層ゴム A に 4mm 程度の沈み込み変形が、積層ゴム B に 4mm 程度の引張り変形が生じている。b 点では、水平変形が直径相当の変形を僅かに超え -95mm となり、積層ゴム A では沈み込み変形がゴム総厚の半分に近い 10mm に達し、水平力が大きく低下している。積層ゴム B では、沈み込み変形が 1mm 程度で、水平力にハードニングが生じている。b 点の状況は、ケース①の a 点とほぼ似たような状況であるが、ケース①よりも水平変形が小さく、積層ゴム A の水平力の低下が小さいため、水平変形が直径相当の変形を超えたにもかかわらず、その直後に破壊することなく再び水平変形が原点まで復帰した。c 点では、水平変形が 110mm を超えている。積層ゴム A では、水平力がさらに大きく低下しており、沈み込み変形がゴム総厚の半分以上を超える 15mm ($\epsilon=68\%$) に達している。積層ゴム B では、水平力にハードニングが認められるが、沈み込み変形の増加も大きく 8mm に達している。また、写真 c より、両積層ゴムともに曲げの変形モードが顕著に表れている。c 点以降は、ケース①と同様に重錘のロッキング的な運動（写真 d）を伴いながら水平変形が増大し、両積層ゴムにはほぼ同時に座屈破壊が生じた（写真 e）。なお、2.5.5 項の検討によれば、本ケースの大入力時の運動パターンは、積層ゴムの沈み込み変形と浮き上がり変形が同時に生じる混在型に分類されたが、破壊時レベルである $3.0 \times L2$ では引張り変形がほとんど生じなかった。これは繰り返し加力に伴い積層ゴムの水平力が低下し、免震層水平力が Q_{up} を上回ることがなくなったためである。

ケース④：図 2.19 では、浮き上がり挙動を明確にするため、破断直前の 1 ループのみを示している。a 点では、負側水平変形が -91mm で最大となる。積層ゴム A の沈み込み変形は 3 mm 程度、積層ゴム B の引張り変形は 6mm 程度である。次に、b 点に向かうループにおいて、積層ゴム B の引張り変形が急増して 33mm ($\epsilon=150\%$) に達する。この間、水平変形は僅かに減少して 75mm となっており、重錘の運動としては積層ゴム A 側を支点として積層ゴム B 側が浮上するロッキング的な運動である。その後、水平変形が原点に戻るのに伴い積層ゴム B の引張り変形は減少していく。c 点において、積層ゴム B の引張り変形ほぼゼロとなるが、積層ゴム A に引張り変形が生じ始めている。すなわち、重錘が積層ゴム B 側での着地と同時に積層ゴム A 側で浮上している。d 点では、正側水平変形が 95mm ($\gamma=432\%$) で最大となる。積層ゴム A の引張

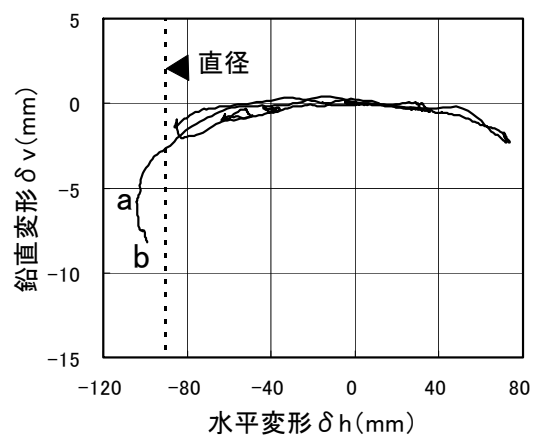
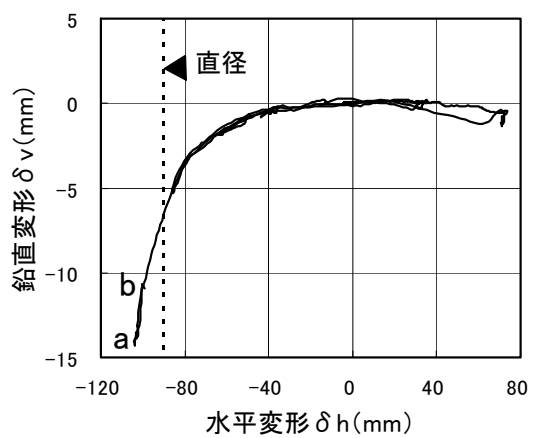
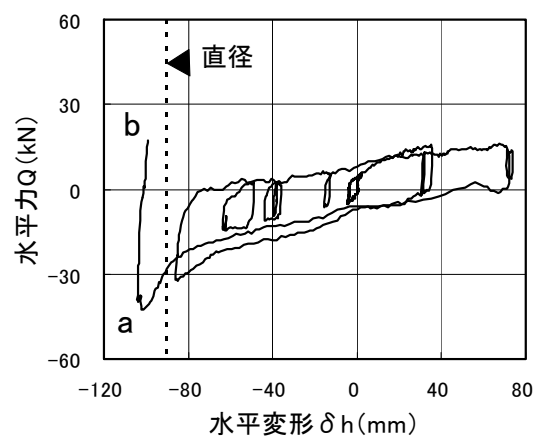
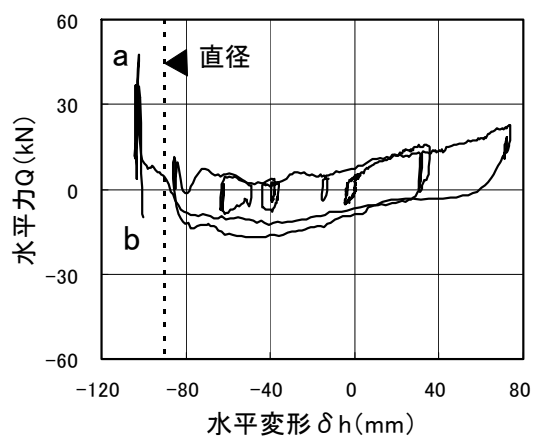
り変形は 21mm 程度、積層ゴム B の沈み込み変形は 3mm 程度である。d 点から e 点においては、積層ゴム B の a 点から b 点で見られた挙動と同様に、積層ゴム A では水平変形が減少しつつ引張り変形が急増した。最終的には、写真 e に示すように e 点で積層ゴム A に引張り破断が生じた。破断時における水平変形は 44mm、引張り変形は 57mm ($\varepsilon=259\%$) である。ケース②と比較して破断時の引張り変形が大きいのは、ケース②よりも水平変形が小さく、積層ゴムが引張り破断に対してより大きな変形能力を有していたためである^{2.13)}。また、破断までの積層ゴムの形状は概ねせん断の変形モードであり、ケース②で見られた積層ゴム中央部のくびれもほとんど認められない。

ケース⑤：積層ゴム A では、水平変形が直径相当の変形 (90mm) 付近までは、水平力の低下はほとんど認められないが、沈み込み変形はケース①と同様に増加している。しかし、水平変形が 90mm を僅かに超えた a 点において水平力は急激に低下する。水平力が頭打ちとなり徐々に低下した LRB のケース①とは大きく異なる挙動を示す。その後、水平変形が原点付近まで回復するが、水平力と沈み込み変形はほぼ同じ履歴を描いて b 点に達する。沈み込み変形は 11mm ($\varepsilon=50\%$) である。積層ゴム B では、a 点に向かうサイクルにおいて沈み込み変形が増加していくが、a 点の直前において変形が引張りに転じ、a 点では 4mm 程度の引張り変形が生じている。これは、同区間において積層ゴム B の水平力がハードニングによって増加し、免震層水平力が Q_{up} を上回ったためと推察される。一方、b 点に向かうサイクルにおいても水平力にハードニングが生じているが、繰り返しのに伴い水平力が低下しているため、引張り変形は生じず、4mm 程度の沈み込み変形が生じている。b 点以降は、写真 c、d に示されるように、重錘のロッキング的な運動による鉛直荷重変動を受け、水平変形が直径を超えた変形から復元することなく徐々に増加した。最終的には、写真 e に示すように、重錘の並進的な運動に伴い両積層ゴムにほぼ同時に座屈破壊が生じた。なお、本ケースはケース③と同じく混在型に分類されているが、破壊直前には引張り変形が生じていない。これはケース③と同様の理由による。

ケース⑥：図 2.21 では、浮き上がり挙動を明確にするため、破断直前の 1 ループのみを示している。基本的な挙動はケース④と同じく、積層ゴム B 側での着地と同時に積層ゴム A 側が浮き上がり、積層ゴム A に引張り破断が生じた。ケース④では、水平変形が最大となった後、減少する際に、引張り変形が急増して引張り破断が生じたが、本ケースでは水平変形が最大となる直前の d 点において引張り破断が生じた。破断時における水平変形は 70mm、引張り変形は 26mm ($\varepsilon=120\%$) である。ケース④と比較して破断時の水平変形が大きいため、破断時の引張り変形が小さくなっていると推

察される。

以上より、積層ゴム破壊時における挙動は、積層ゴムが座屈破壊するタイプと積層ゴムが引張り破断するタイプに大別される。前者では、直径相当の変形を超える水平変形下において、過大な圧縮荷重を受ける側の積層ゴムの水平力が大きく低下し、その直後に生じた重錘のロッキング的な運動に伴う荷重変動によりもう一方の積層ゴムの水平力も低下した。最終的には、免震層全体として復元力が失われ、重錘の並進的な運動に伴い両積層ゴムにほぼ同時に座屈破壊が生じた。後者については、免震層水平力が浮き上がり限界水平力を越えたことをきっかけとして、一方の積層ゴムを支点として他方が浮き上がり、積層ゴムに引張り破断が生じた。



積層ゴム A

積層ゴム B

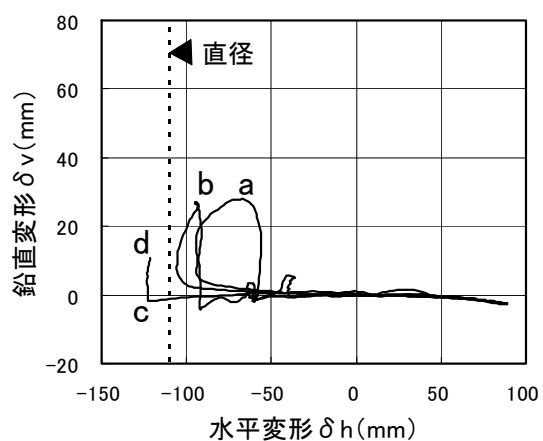
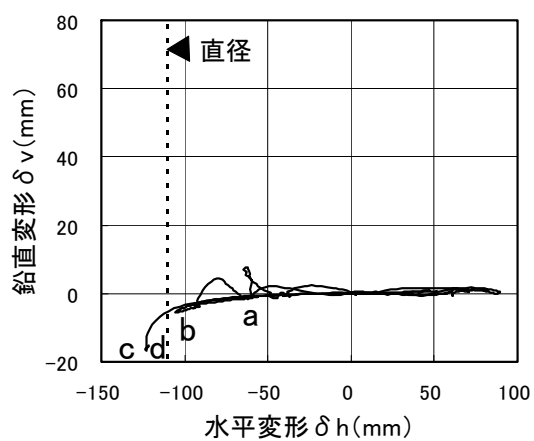
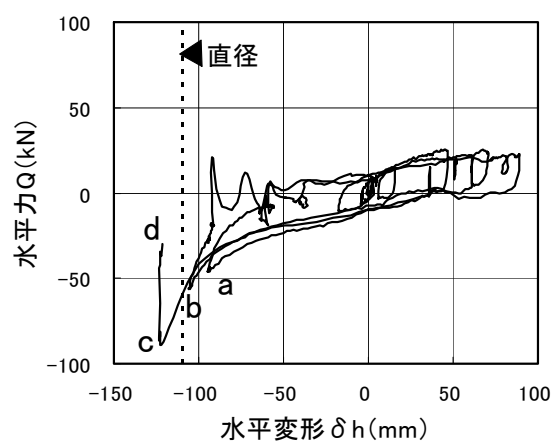
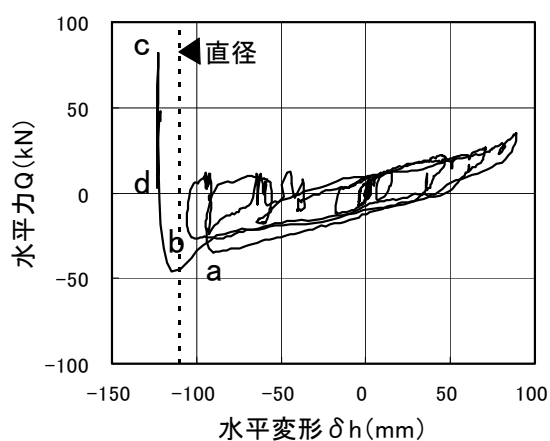
図 2.16 積層ゴム破壊時の履歴特性 (ケース①)



積層ゴム A

積層ゴム B

写真 2.3 積層ゴム破壊時の状況 (ケース①)



積層ゴム A

積層ゴム B

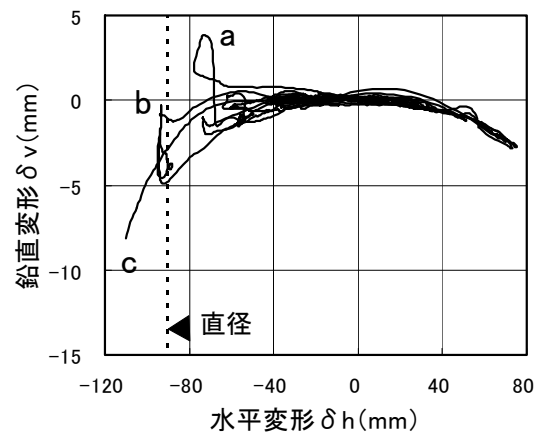
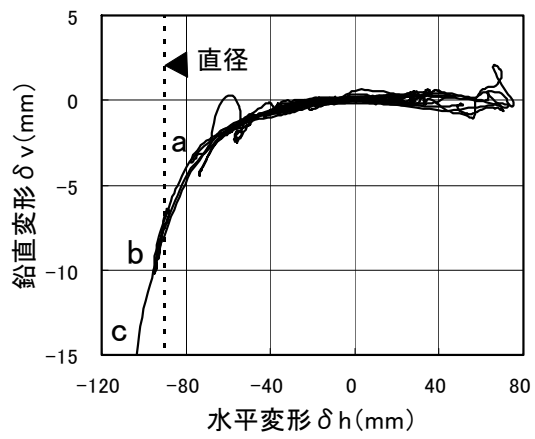
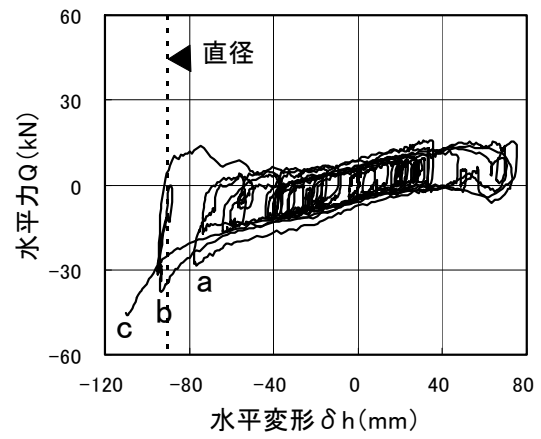
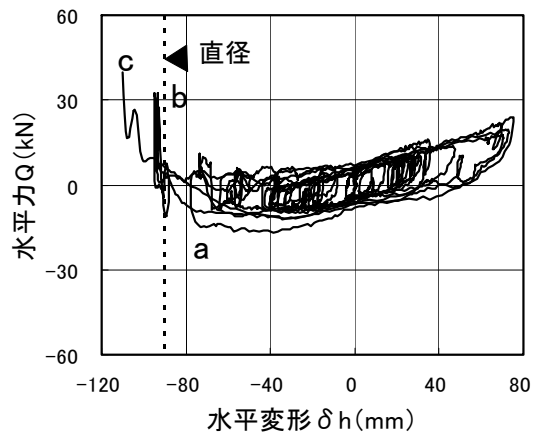
図 2.17 積層ゴム破壊時の履歴特性 (ケース②)



積層ゴム A

積層ゴム B

写真 2.4 積層ゴム破壊時の状況 (ケース②)



積層ゴム A

積層ゴム B

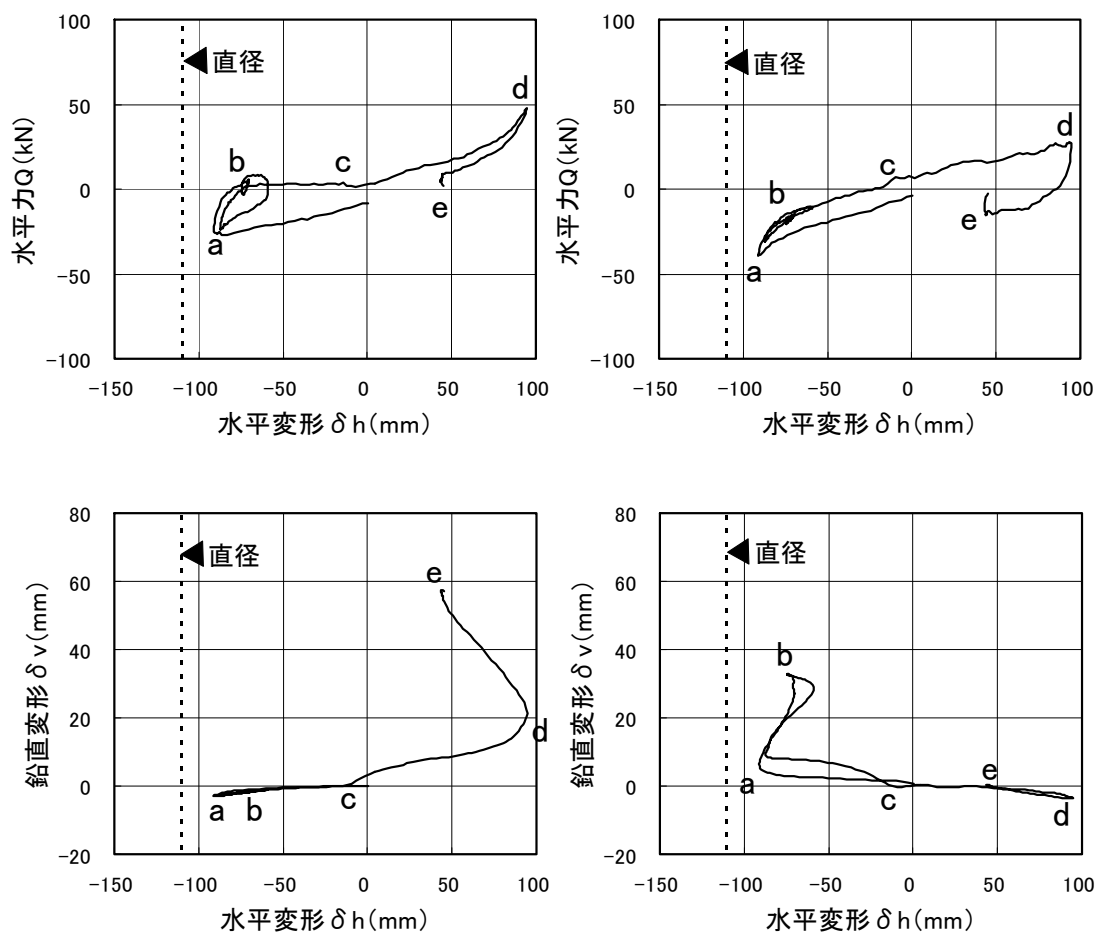
図 2.18 積層ゴム破壊時の履歴特性 (ケース③)



積層ゴム A

積層ゴム B

写真 2.5 積層ゴム破壊時の状況 (ケース③)



積層ゴム A

積層ゴム B

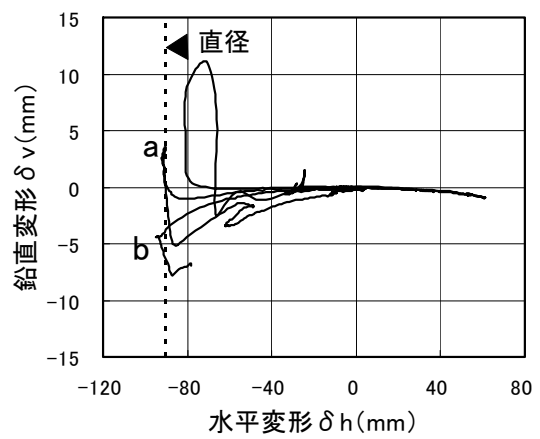
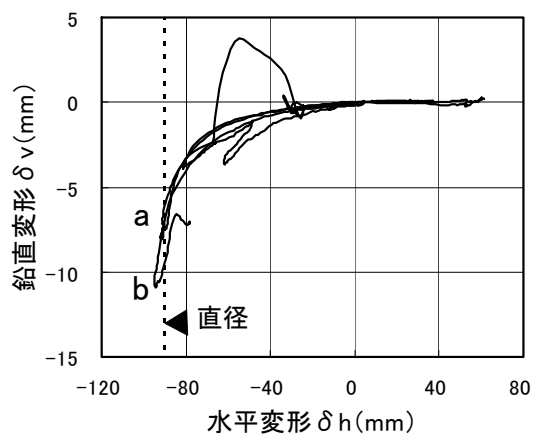
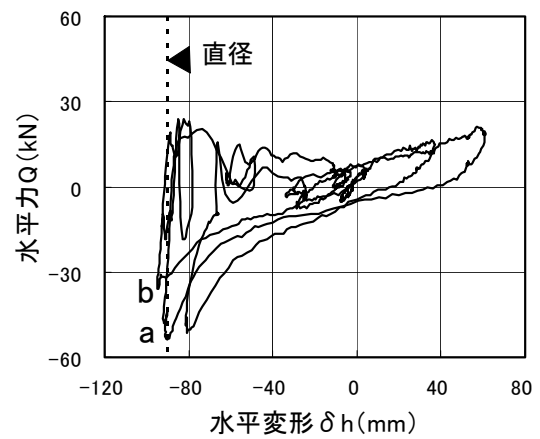
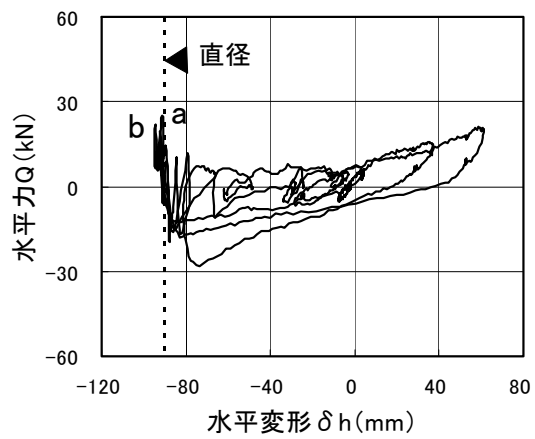
図 2.19 積層ゴム破壊時の履歴特性 (ケース④)



積層ゴム A

積層ゴム B

写真 2.6 積層ゴム破壊時の状況 (ケース④)



積層ゴム A

積層ゴム B

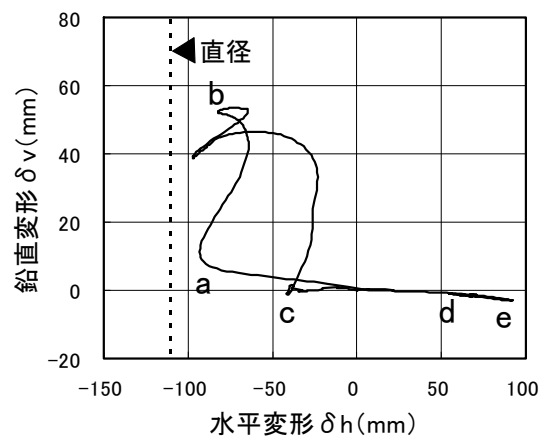
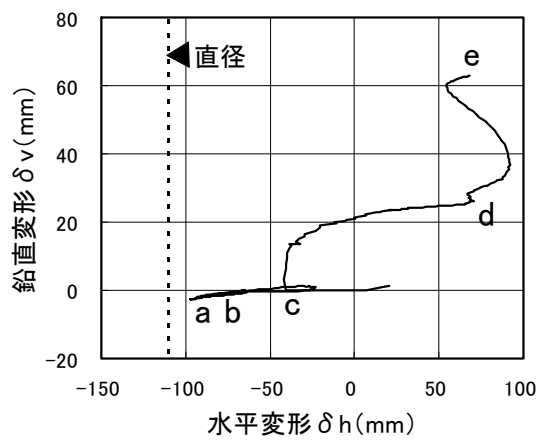
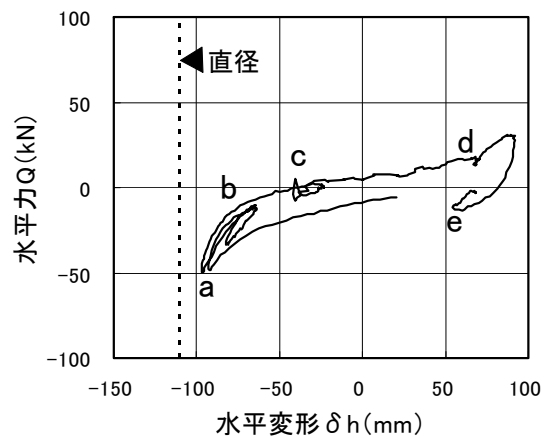
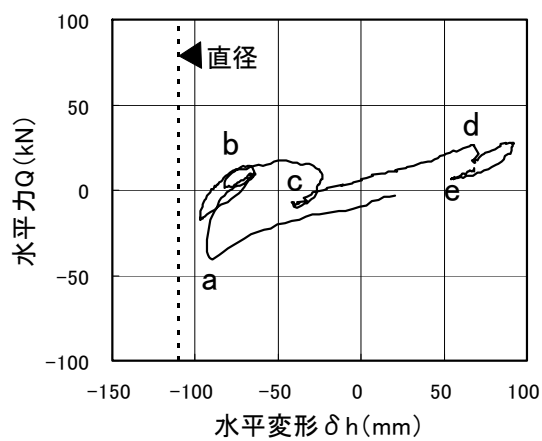
図 2.20 積層ゴム破壊時の履歴特性 (ケース⑤)



積層ゴム A

積層ゴム B

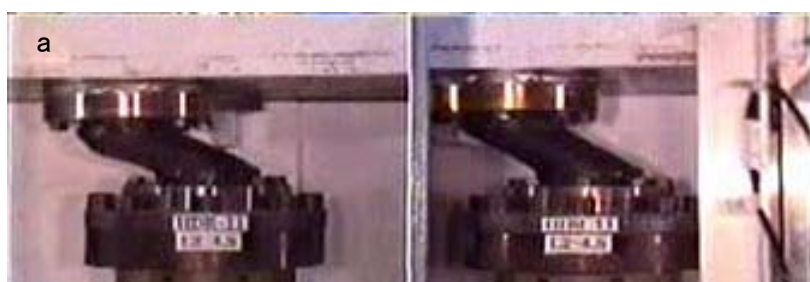
写真 2.7 積層ゴム破壊時の状況 (ケース⑤)



積層ゴム A

積層ゴム B

図 2.21 積層ゴム破壊時の履歴特性 (ケース⑥)



積層ゴム A

積層ゴム B

写真 2.8 積層ゴム破壊時の状況 (ケース⑥)

2.5.9 引張り変形時の詳細挙動

積層ゴムが座屈破壊したケース①、③、⑤では、水平変形が直径相当の変形を超えることが一つの目安となり、比較的分かりやすい挙動を示した。一方、積層ゴムが引張り破断したケース②、④、⑥については、ケース②では直径相当の変形を上回る水平変形下において比較的小さい引張り変形で破断が、ケース④、⑥では直径の半分以下の水平変形下において大きな引張り変形で破断が生じるなど、異なる挙動が現れた。そこで、ケース②、④を対象とし、引張り変形時の詳細な挙動を時刻歴波形により分析した。図 2.22 に、積層ゴム鉛直変形、免震層水平力、免震層水平変形の時刻歴波形を拡大して示す。ケース④は引張り破断が生じた加振レベル $4.0 \times L2$ 、比較のためケース②も同じく $4.0 \times L2$ を示している。これらの図より、以下のことが指摘できる。

時刻 a において、免震層水平力が Q_{up} を超え、積層ゴム B の引張り変形が増加し始める。その後、免震層の水平変形と水平力が極大となる時刻 b までは、引張り変形の増加量は小さい。ケース②では引張り変形がほとんど増加しないが、これはケース④と比較して水平変形が大きく、それに伴い生じた沈み込み変形により相殺されたためと推察される。時刻 b では、水平変形と水平力は極大となり、その後引張り変形が急激に増加する。引張り変形が生じている区間における水平変形の変動は小さく、重錘の浮き上がりをきっかけとして、並進的の運動がロッキング的な運動に変換された様子が分かる。引張り変形の極大値は、ケース②が 24mm、ケース④が 33mm であり、変形量に差異が生じている。これは、塔状比が大きく Q_{up} の小さいケース④の方が、浮き上がりが生じた時刻 a における水平変形が小さいためである。その結果、浮き上がった瞬間の重錘の水平速度が大きくなり、ケース④では、浮き上がりに必要な運動エネルギーをより多く有していることになる。

時刻 c において積層ゴム B の引張り変形がほぼゼロとなり重錘は着地する。その後、回転の慣性力によって重錘は再び浮き上がり積層ゴム A に引張り変形が生じる。再浮上後における引張り変形を比較すると、ケース②が 6mm、ケース④が 57mm で、両ケースの変形量には大きな違いがある。これについては、着地した時刻 c における免震層水平力の符号に着目した。ケース②では、浮上時間が短いため時刻 c における免震層水平力の符号は初めに浮き上がった時と同じく負であり、その直後も負側に増加し -30kN となる。重錘には再浮上の方向とは逆向きの水平力が作用する。一方、ケース④では、浮上時間が長いため時刻 c において免震層水平力の符号が正となっており、その後も正側に増加する。重錘には再浮上と同方向の水平力が作用している。すなわち、前者では着地に伴う重錘の浮き上がりが、逆方向の水平力によって相殺されたのに対し、後者では同方向の水平力によって増長されたと推察される。塔状比が大

きくなるほど、浮き上がった重錘が着地し、その直後に連続して浮き上がりが生じやすくなる。

以上より、塔状比が大きくなると、着地直後に生じる浮き上がり挙動も含めて、水平変形が小さい領域で引張り変形が生じやすくなる。一方、小変形域では引張り破断に対する変形能力が向上するため、積層ゴムはより大きな引張り変形を許容できる^{2.13)}。このことは、塔状比の異なるケース②とケース④において終局加振レベルに大きな違いが見られなかった要因の一つである。実験では引張り変形能力に優れた縮小試験体を用いているため、定量的に評価することは難しいが、本実験から得られた結果は、塔状比が大きくなっても、積層ゴムに引張り破断が生じる入力レベルが著しく低下するわけではなく、引張り変形が生じた後も破断まである程度の余裕を有していることを示唆している。

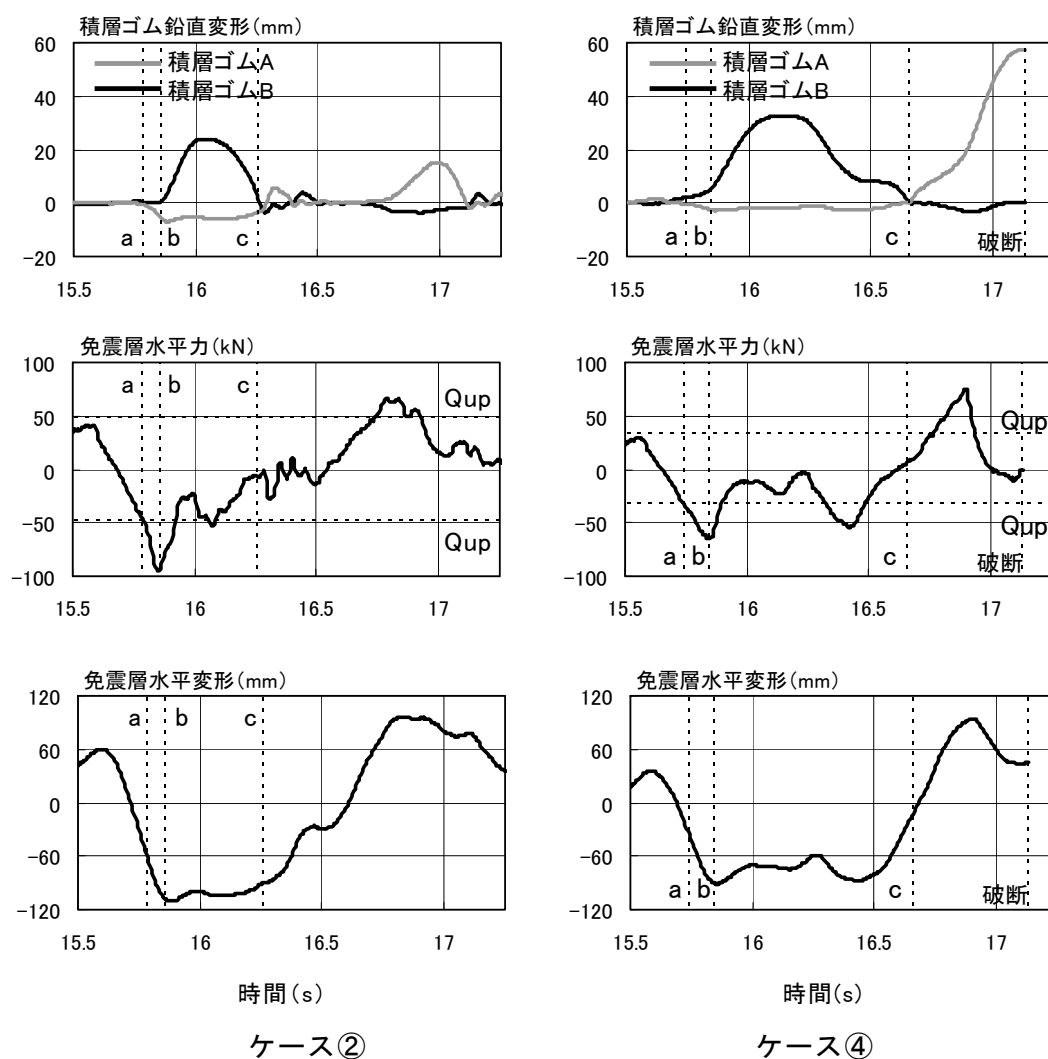


図 2.22 時刻歴波形の比較

2.5.10 終局加振レベルの評価

本実験の結果を既往の限界特性に関する提案式と比較し、本実験による積層ゴムの終局加振レベルを評価した。

鉛プラグ入り積層ゴムについて、沈み込み型のケース①及び混在型のケース③の沈み込み変形が生じた積層ゴム A に着目した。図 2.23 に、 $1.5 \times L2$ 以上の加振レベルにおける最大せん断ひずみとその時の面圧 σ をプロットした。■と●は水平復元力特性において負勾配が生じたことを表す。図中の直線は積層ゴムメーカーが提示する圧縮荷重下での限界性能線で、水平復元力特性における負勾配の発生に応じて規定されたものである^{2.14)}。これより、実験で初めて負勾配が確認された加振レベル $2.0 \times L2$ が限界性能線に概ね対応している。一方、積層ゴムの破壊は $3.0 \times L2$ で生じているが、 $2.0 \times L2$ 以上において負勾配が発生し、水平変形が直径相当の変形に近づくことを考慮すれば、圧縮に対する終局加振レベルは概ね $2.5 \times L2$ 前後と考えるのが妥当である。

鉛プラグ入り積層ゴムについて、浮き上がり型のケース②、④の引張り変形を受ける積層ゴム B に着目した。図 2.24 に、 $2.0 \times L2$ 以上の加振レベルの最大鉛直ひずみ(鉛直変形/ゴム総厚)とその時のせん断ひずみをプロットした。直線は積層ゴムの引張り限界ひずみである^{2.13)}。これより、両ケースともに $3.0 \times L2$ において引張り限界ひずみを超えている。破断レベルが引張り限界ひずみを大きく上回った原因については、使用した積層ゴムが引張り変形能力に優るとされる小型模型であること、さらに、引張り限界ひずみが直径 500mm 程度の積層ゴムの引張り試験結果を安全側に評価したものであることが考えられる。積層ゴムの終局挙動に及ぼすスケール効果については、実大規模の積層ゴムを用いた実験のデータが少なく、十分な検証がなされていないのが現状である^{2.15)}。ただし、引張りを受ける積層ゴムの挙動については、フランジの面外変形によりゴム層の応力分布が不均一になるため、直径が大きいほどスケール効果が顕著になることが予想される。例えば、文献 2.16)には直径 500~1200mm の積層ゴムの実験結果より、直径が大きくなるにつれて引張り破断ひずみが低下の傾向を示すことが報告されており、実大規模の積層ゴムの引張り破断ひずみは、模型のそれよりも小さくなると考えられる。すなわち、実大規模の建物を想定した場合、引張りに対する終局加振レベルは、本実験から得られた結果よりもさらに小さくなると考えるべきである。

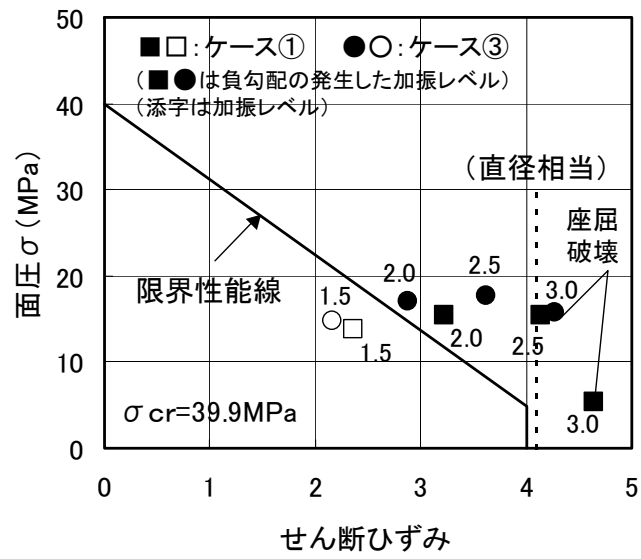


図 2.23 限界性能線との比較（圧縮）

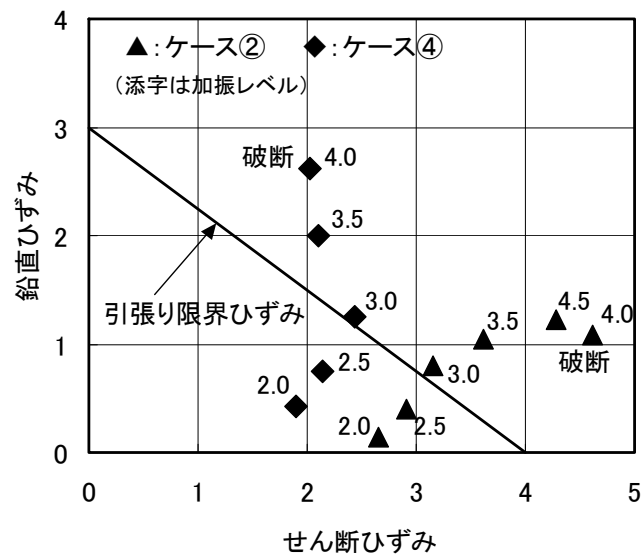


図 2.24 限界性能線との比較（引張り）

2.6 まとめ

積層ゴムで支持した免震建物の終局挙動を解明することを目的として、縮小免震建物模型を用いた振動台実験を実施した。実験変数としては、上部構造の塔状比と積層ゴムの形状・面圧を採用した。塔状比は4及び6の2ケース、積層ゴムの形状・面圧は、直径90mm・面圧7.55MPa(相対的に小径・高面圧)と直径110mm・面圧5.05MPa(相対的に大径・低面圧)の2ケースを設定した。ゴム総厚は22mmで共通である。積層ゴムは、減衰機能を併せ持った鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)及び高減衰積層ゴム(HDB)を用いた。これらを組み合わせた6ケースについて、BCJ-L2波の振幅拡張波の水平1方向入力により積層ゴムが破壊に至るまで加振した。実験結果より、各要因が終局挙動に与える影響、終局時における挙動について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 大入力時における運動パターンは、重錘の並進的な運動により両方の積層ゴムに沈み込み変形が生じ重錘全体が沈み込む「沈み込み型」、重錘のロッキング的な運動により積層ゴムに引張り変形が生じ重錘が浮き上がる「浮き上がり型」、積層ゴムの沈み込み変形と引張り変形が同時に生じる「混在型」に分類された。沈み込み型では、最終的に水平変形が直径相当の変形を超え、積層ゴムに座屈破壊が生じた。浮き上がり型では、積層ゴムに大きな引張り変形が生じ最終的に積層ゴム引張り破断が生じた。
- (2) 大入力時における重錘の運動パターンは、塔状比(H/B)によって定まる剛体の静的浮き上がり限界水平力 Q_{up} ($=W/(H/B)$) と積層ゴムの形状・面圧に関する免震層水平力 Q_h の大小関係に支配されており、 $Q_{up} < Q_h$ の場合には基本的に浮き上がり型となり、 $Q_{up} > Q_h$ の場合には沈み込み型となる。一方、沈み込み変形は免震層水平変形が積層ゴムの直径に相当する変形に近づくほど増加する。よって、 $Q_{up} < Q_h$ で引張り変形が生じていても、水平変形が直径相当の変形に近づくると沈み込み変形が生じる可能性が高くなり、混在型に分類されることになる。
- (3) 大入力時における積層ゴムの水平力－水平変形曲線及び鉛直荷重－鉛直変形曲線は沈み込み型と浮き上がり型で大きく異なっていた。浮き上がり型では、水平力は水平変形だけに、鉛直変形は鉛直荷重だけに専ら依存する単純な性状を示すが、沈み込み型では、水平力が水平変形だけでなく鉛直荷重にも、鉛直変形が鉛直荷重だけでなく水平変形にも強く影響され、複雑な挙動を示した。
- (4) 積層ゴム破壊時における挙動は、積層ゴムが座屈破壊するタイプと積層ゴムが引張り破断するタイプに大別された。前者では、直径相当の変形を超える水平変形下において、過大な圧縮荷重を受ける側の積層ゴムの水平力が大きく低下し、そ

の直後に生じた重錘のロッキング的な運動に伴う荷重変動によりもう一方の積層ゴムの水平力も低下した。最終的には、免震層全体として復元力が失われ、重錘の並進的な運動に伴い両積層ゴムにほぼ同時に座屈破壊が生じた。後者については、免震層水平力が Q_{up} を超えたことをきっかけとして、一方の積層ゴスを支点として他方が浮き上がり、積層ゴムに引張り破断が生じた。また、塔状比によらず終局加振レベルは同程度であったが、これは、塔状比が大きくなると、引張り変形能力の大きい小変形域で引張り変形が生じやすくなり、破断時の引張り変形が大きくなったためである。このことは、塔状比が大きくなっても、積層ゴムが引張り破断する入力レベルが著しく低下することはない、引張り変形が生じた後も破断までの余裕を有していることを示唆している。

- (5) 形状と面圧が等しく水平特性が概ね同程度の HDB と LRB について、破壊時における挙動を比較した。HDB では大変形時にハードニングが顕著となるため、LRB と比較して浮き上がりが生じやすい。しかし、水平変形が直径相当の変形を超えると水平力が急激に低下し、LRB と同様に積層ゴムが座屈破壊した。一方、引張り変形が生じたときの鉛直方向の履歴挙動については、HDB と LRB に大きな違いは認められなかった。
- (6) 小径・高面圧のケースでは、加振レベル $2.0 \times L2$ で水平復元力特性に負勾配が初めて確認され、このレベルが圧縮に関する限界性能線に概ね対応した。最終的には $3.0 \times L2$ で座屈破壊に至ったが、負勾配が発生し水平変形が直径相当の変形に近づくことを考慮すれば、本実験における座屈に対する終局加振レベルは $2.5 \times L2$ 前後と考えられる。一方、大径・低面圧のケースは、引張りに関する限界性能線を大きく超えた $4.0 \times L2$ あるいは $4.5 \times L2$ で引張り破断した。これは、引張り変形能力に優るとされる小型積層ゴムを用いたこと、比較に用いた限界性能線が安全側に評価されたものであることが原因と考えられる。よって、実大規模を想定した場合、本実験結果よりもさらに低い加振レベルで積層ゴムの引張り破断が生じると考えるべきである。
- (7) 上記の知見は上部構造を剛体とした実験より導かれたものであるが、実免震建物の終局挙動の定性的な評価にも適用可能と考えられる。一方、終局挙動を予測するためには解析的な検討が必要となる。大入力時における上部構造の運動パターンが免震層水平力に依存することを考慮すれば、積層ゴムの終局時の復元力特性を精度よく表現するモデルを取り入れた解析手法の構築が必要である。これらの手法については、第 3～5 章において詳述することとする。

第 2 章参考文献

- 2.1) 鬼丸貞友、加藤朝朗、鶴巻静雄、広谷勉、小山実：FBR 免震型プラントの構築に関する研究 その 11 免震層の動的破断試験（試験結果の概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、pp.1569-1570、1992.8.
- 2.2) Kato M, Watanabe Y, Kato A, Koshida H, Mizukoshi K, Fukushima Y, Nojima O, Yoneda G, Onimaru S: Dynamic breaking tests on base-isolated FBR plant, 12th SMiRT, Vol.K2, pp.267-272, 1993.
- 2.3) Moteki M, Kawai N, Ishida K, Yabana S, Nojima O: Shaking table test on ultimate behavior of seismic isolation system. Part 1: Outline of the test and response of superstructure, Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Vol.4, pp.2271-2276, 1992.
- 2.4) Ishida K, Shiojiri H, Yoneda G, Matsuda A: Shaking table test on ultimate behavior of seismic isolation system. Part 2: Response behavior of rubber bearings, Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Vol.4, pp.2411-2416, 1992.
- 2.5) 猿田正明、田村和夫、菊池優：積層ゴムに引張り軸力を生じる免震架構の振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.669-670、1997.9.
- 2.6) 久野雅祥、長島一郎、欄木龍大、富島誠司、飯島昭治：「複合免震構法の高さ幅比の大きい建物への適用に関する実験的研究（その 1 振動台実験）」、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.603-604、1998.9.
- 2.7) 三山剛史、増田圭司：積層ゴムを用いたアスペクト比の高い免震建物の振動台実験 積層ゴムに生じる引張力とその後の着座による振動性状、日本建築学会構造系論文集、第 573 号、pp.61-68、2003.11.
- 2.8) （社）日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の応答制御技術研究委員会報告書・論文集、2002.6.
- 2.9) 多田英之、高山峯夫他：4 秒免震への道－免震構造設計マニュアル、pp.31-32、理工図書、1997.
- 2.10) （株）ブリヂストン：天然ゴム系積層ゴム支承技術資料
- 2.11) （社）日本ゴム協会 免震用積層ゴム委員会編：設計者のための免震用積層ゴムハンドブック、理工図書、2000 年.
- 2.12) 建設省建築研究所、（財）日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針（案）、1991.
- 2.13) 高山峯夫：免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能、日本建築

学会技術報告集、第 1 号、pp.160-165、1995.12.

2.14) (株)ブリヂストン：鉛プラグ挿入型積層ゴム支承技術資料

2.15) 日本免震構造協会技術委員会実験 WG：積層ゴムのスケール効果確認試験結果の報告、MENSIN、No.35、pp.22-37、2002.2.

2.16) 村松佳孝、西川一郎、川端一三、高山正春、木村雄一：大サイズ天然ゴム系積層ゴムアイソレータの引張特性、日本建築学会技術報告集第 12 号、pp.53-56、2001.1.

第3章 圧縮荷重を受ける積層ゴムの 大変形挙動を表す力学モデル

3.1 はじめに

免震建物の地震時挙動は、使用している免震部材の力学特性に強く支配されていることが特徴である。従って、積層ゴムを用いた免震建物の特性を把握するためには、積層ゴムの力学特性を正確に理解することが重要である。一般に、設計レベルの入力地震動に対する水平変形下においては、積層ゴムは水平方向と鉛直方向ともに安定した特性を示す。しかし、設計レベルを超えるような地震動による大きな水平変形下においては、鉛直荷重の大小に応じて水平復元力が低下し、大きな鉛直沈み込み変形が生じるなどの複雑な非線形挙動が現れる。このような積層ゴムの挙動が建物全体の終局挙動に影響を与えることは、前章の振動台実験の結果からも明らかであり、免震建物の終局挙動を把握するためには、積層ゴムの終局挙動をより正確に把握することが重要な課題となる。

一方、免震建物の終局挙動を時刻歴応答解析によって予測する場合、上に述べた積層ゴムの大変形域における複雑な復元力特性を精度よく表現する力学モデルが必要となる。これまでに、積層ゴムの終局付近までをトレースできる水平履歴則がいくつか提案されている^{3.1)~3.3)}。これらは、座屈面圧の20%程度以下の低面圧に対する水平挙動を模擬するものとして有効であるが、水平復元力特性に及ぼす鉛直荷重の影響や鉛直沈み込み変形を評価することができず、大きな圧縮荷重を受けるような終局挙動の予測には適用できない。これらのモデルに対して、飯塚は Koh-Kelly のモデル^{3.4)}に幾何学的非線形と材料非線形を導入して拡張した大変形マクロモデル^{3.5)、3.6)}を提案した。そして、実験結果の数値解析を行い、このモデルによって積層ゴムの大変形復元力特性の強非線形特性を表現できることを示した。さらに、飯塚は圧縮荷重の変動にも対応できるようにモデルの構成式を拡張し^{3.7)}、このモデルが変動圧縮荷重を受ける積層ゴムの実験結果を精度よく再現できることを確認した^{3.8)}。しかし、軸方向のばねを持たないため鉛直剛性を直接評価することができず、地震応答解析に適用することができなかった。

以上の背景の下、上述の大変形マクロモデルについて、地震応答解析への適用が可能なように拡張を行うとともに、拡張されたモデルの精度を確認するために、積層ゴム単体の数値解析を実施した。なお、本章では、減衰を持たない天然ゴム系積層ゴムを対象として議論を進める。

3.2 修正マクロモデル

3.2.1 モデルの概要

積層ゴムの $P-\delta$ 効果を考慮した場合の力学挙動を表すモデルとして、Koh・Kelly のモデル^{3.4)}が提案されている。このモデルは図 3.1 に示すように、せん断変形及び曲げ変形をそれぞれ 1 つに集約したせん断ばね及び回転ばね、高さを表す剛体要素によって積層ゴムを表現したものである。微小変位と線形ばねを仮定すると、一定軸力下の水平剛性について、Haringx 理論^{3.9)}に基づく厳密解とほぼ一致する解が得られる。一方、このモデルの単純さを活かしながら、終局挙動を含めた大変形域に適用するため、Koh・Kelly のモデルに幾何学的非線形と材料非線形を導入して拡張した大変形マクロモデルが提案されている^{3.5)~3.7)}。基本的なモデルの構成は図 3.1 と同様であるが、せん断ばね及び回転ばねに適当な非線形特性を与えることによって、圧縮荷重下で単調載荷による大変形を受ける積層ゴムの終局挙動を表現することができる。ただし、図 3.1 から分かるように、軸方向のばねを持たないため鉛直剛性を直接評価することができない。積層ゴムの鉛直剛性は水平変形が大きくなるほど低下する特性を有しており^{3.10)}、本モデルを地震応答解析に適用した場合、鉛直剛性が正確に評価されず大変形域において十分な解析精度が得られない可能性がある。そこで、鉛直剛性の評価が可能なモデルとして、図 3.2 に示すように、従来の大変形マクロモデルの剛体要素とせん断ばねの間に新たに軸ばねを付け加えた新規モデルを考案し、軸ばねの非線形特性を考慮して定式化を行った。なお、以下ではこのモデルを「修正マクロモデル」と呼ぶこととする。

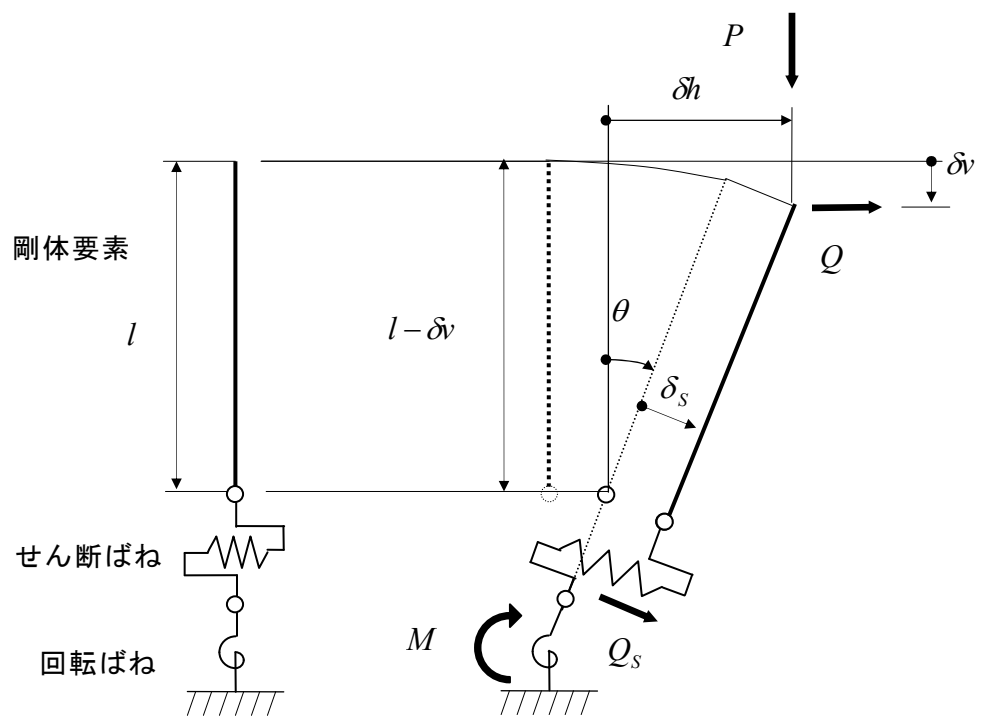


図 3.1 Koh-Kelly のモデル

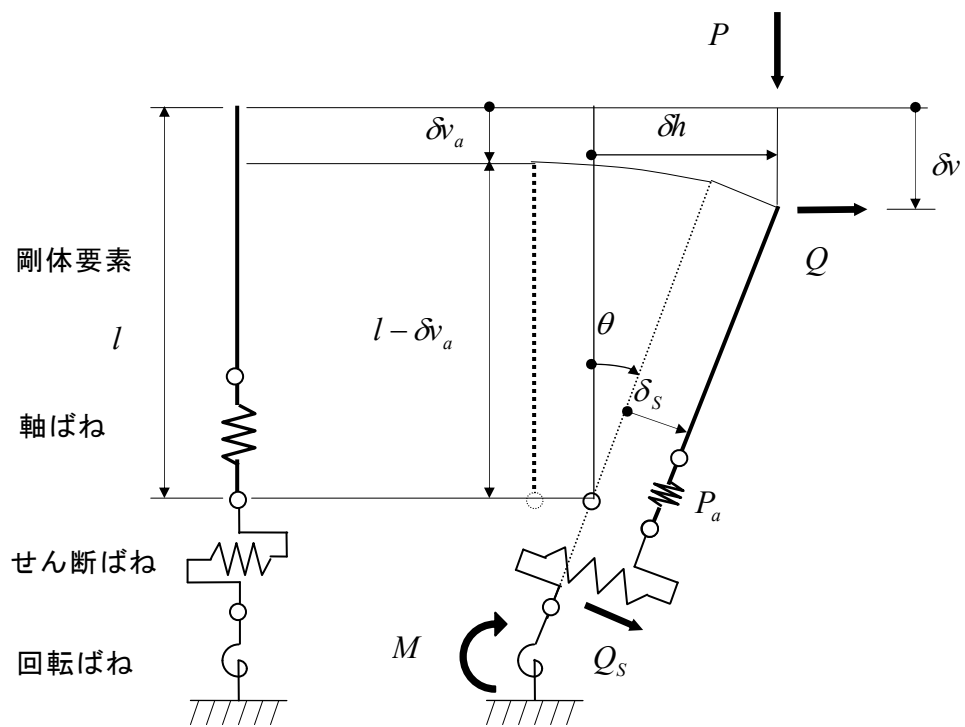


図 3.2 修正された大変形マクロモデル (修正マクロモデル)

3.2.2 モデルの構成式

図 3.2 より、変形の幾何学的関係から次式が成立する。

$$\delta v = l(1 - \cos \theta) + \delta_s \sin \theta + \delta v_a \cos \theta \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

$$\delta h = l \sin \theta + \delta_s \cos \theta - \delta v_a \sin \theta \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

圧縮荷重と水平力によって軸ばねに生じる軸方向荷重が次式によって与えられる。

$$P_a = P \cos \theta - Q \sin \theta \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

曲げモーメントのつり合いより次式が得られる。

$$M = P \delta h + Q(l - \delta v) \quad \dots \dots \dots (3.4)$$

曲げモーメントによって生じた傾斜面におけるせん断力のつり合いより次式が得られる。

$$Q_s = P \sin \theta + Q \cos \theta \quad \dots \dots \dots (3.5)$$

ここで、 l は積層ゴムの全高さ、 δv は積層ゴム全体の鉛直変形、 δv_a は軸ばねの軸方向変形、 δh は積層ゴムの水平変形、 δ_s はせん断ばねの変形、 θ は回転ばねの回転角、 P は鉛直荷重、 Q は水平力、 P_a は軸ばねに作用する力、 Q_s はせん断ばねに作用する力、 M は回転ばねに作用するモーメントである。変形、荷重、モーメントはいずれも矢印の向きを正とする。 P_a は δv_a と θ の2変数関数、 M は θ と P の2変数関数、 Q_s は δ_s の1変数関数でそれぞれ定義する。すなわち、

$$P_a = P_a(\delta v_a, \theta) \quad \dots \dots \dots (3.6)$$

$$M = M(P, \theta) \quad \dots \dots \dots (3.7)$$

$$Q_s = Q_s(\delta_s) \quad \dots \dots \dots (3.8)$$

(3.1)、(3.2)式を微分すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta \delta v &= l \sin \theta \Delta \theta + \sin \theta \Delta \delta_s + \delta_s \cos \theta \Delta \theta + \cos \theta \Delta \delta v_a - \delta v_a \sin \theta \Delta \theta \\ &= (l \sin \theta - \delta v_a \sin \theta + \delta_s \cos \theta) \Delta \theta + \sin \theta \Delta \delta_s + \cos \theta \Delta \delta v_a \\ &= \delta h \Delta \theta + \sin \theta \Delta \delta_s + \cos \theta \Delta \delta v_a \quad \dots \dots \dots (3.9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \delta h &= l \cos \theta \Delta \theta + \cos \theta \Delta \delta_s - \delta_s \sin \theta \Delta \theta - \sin \theta \Delta \delta v_a - \delta v_a \cos \theta \Delta \theta \\ &= (l \cos \theta - \delta v_a \cos \theta - \delta_s \sin \theta) \Delta \theta + \cos \theta \Delta \delta_s - \sin \theta \Delta \delta v_a \\ &= (l - \delta v) \Delta \theta + \cos \theta \Delta \delta_s - \sin \theta \Delta \delta v_a \quad \dots \dots \dots (3.10) \end{aligned}$$

(3.3)、(3.6)式を微分すると次式が得られる。

$$\Delta P_a = \cos \theta \Delta P - P \sin \theta \Delta \theta - \sin \theta \Delta Q - Q \cos \theta \Delta \theta \quad \dots \dots \dots (3.11)$$

$$\Delta P_a = \frac{\partial P_a}{\partial \delta v_a} \Delta \delta v_a + \frac{\partial P_a}{\partial \theta} \Delta \theta \quad \dots \dots \dots (3.12)$$

(3.11)、(3.12)式より、

$$\Delta\delta v_a = \frac{1}{K_v} \{ \cos\theta\Delta P - \sin\theta\Delta Q - (P\sin\theta + Q\cos\theta + P'_a)\Delta\theta \} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (3.13)$$

ここで、 $K_v = \frac{\partial P_a}{\partial \delta v_a}$ 、 $P'_a = \frac{\partial P_a}{\partial \theta}$ である。

(3.9)、(3.10)式をマトリクス表示すると

$$\begin{Bmatrix} \Delta\delta v \\ \Delta\delta h \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta h & \sin\theta \\ l - \delta v & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\delta_s \end{Bmatrix} + \Delta\delta v_a \begin{Bmatrix} \cos\theta \\ -\sin\theta \end{Bmatrix} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (3.14)$$

(3.14)式に(3.13)式を代入すると

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \Delta\delta v \\ \Delta\delta h \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \delta h & \sin\theta \\ l - \delta v & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\delta_s \end{Bmatrix} \\ &+ \frac{1}{K_v} \{ \cos\theta\Delta P - \sin\theta\Delta Q - (P\sin\theta + Q\cos\theta + P'_a)\Delta\theta \} \begin{Bmatrix} \cos\theta \\ -\sin\theta \end{Bmatrix} \quad \cdot \cdot \cdot (3.15) \end{aligned}$$

上式を整理して

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \Delta\delta v \\ \Delta\delta h \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \delta h & \sin\theta \\ l - \delta v & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\delta_s \end{Bmatrix} + \frac{1}{K_v} \begin{bmatrix} \cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix} \\ &+ \frac{1}{K_v} \begin{bmatrix} -P\sin\theta\cos\theta - Q\cos^2\theta - P'_a\cos\theta & 0 \\ P\sin^2\theta + Q\sin\theta\cos\theta + P'_a\sin\theta & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\delta_s \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \delta h - \frac{P}{K_v}\sin\theta\cos\theta - \frac{Q}{K_v}\cos^2\theta - \frac{P'_a}{K_v}\cos\theta & \sin\theta \\ l - \delta v + \frac{P}{K_v}\sin^2\theta + \frac{Q}{K_v}\sin\theta\cos\theta + \frac{P'_a}{K_v}\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\delta_s \end{Bmatrix} \\ &+ \frac{1}{K_v} \begin{bmatrix} \cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix} \\ &= [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\delta_s \end{Bmatrix} + \frac{1}{K_v} \begin{bmatrix} \cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (3.16) \end{aligned}$$

ここで、

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \delta h - \frac{P}{K_v}\sin\theta\cos\theta - \frac{Q}{K_v}\cos^2\theta - \frac{P'_a}{K_v}\cos\theta & \sin\theta \\ l - \delta v + \frac{P}{K_v}\sin^2\theta + \frac{Q}{K_v}\sin\theta\cos\theta + \frac{P'_a}{K_v}\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (3.17)$$

(3.4)、(3.5)、(3.7)、(3.8) 式をそれぞれ微分すると次式が得られる。

$$\Delta M = \delta h \Delta P + P \Delta \delta h + (l - \delta v) \Delta Q - Q \Delta \delta v \quad \dots \dots \dots (3.18)$$

$$\Delta Q_s = \sin \theta \Delta P + P \cos \theta \Delta \theta + \cos \theta \Delta Q - Q \sin \theta \Delta \theta \quad \dots \dots \dots (3.19)$$

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial M}{\partial \theta} \Delta \theta \quad \dots \dots \dots (3.20)$$

$$\Delta Q_s = \frac{dQ_s}{d\delta_s} \Delta \delta_s \quad \dots \dots \dots (3.21)$$

(3.18)～(3.21)式をマトリクス表示すると

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \frac{\partial M}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & \frac{dQ_s}{d\delta_s} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \delta_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial M}{\partial P} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \delta h & l - \delta v \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ P \cos \theta - Q \sin \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \delta_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -Q & P \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta v \\ \Delta \delta h \end{Bmatrix} \\ & \dots \dots \dots (3.22) \end{aligned}$$

上式を整理すると

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \delta h - \frac{\partial M}{\partial P} & l - \delta v \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial M}{\partial \theta} & 0 \\ Q \sin \theta - P \cos \theta & \frac{dQ_s}{d\delta_s} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \delta_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} Q & -P \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta v \\ \Delta \delta h \end{Bmatrix} \\ &= [K] \begin{Bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \delta_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} Q & -P \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta v \\ \Delta \delta h \end{Bmatrix} \quad \dots \dots \dots (3.23) \end{aligned}$$

ここで、

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{\partial M}{\partial \theta} & 0 \\ Q \sin \theta - P \cos \theta & \frac{dQ_s}{d\delta_s} \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (3.24)$$

(3.16)式より次式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \delta_s \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \Delta \delta v \\ \Delta \delta h \end{Bmatrix} - \frac{1}{K_v} [T] \cdot \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix} \quad \dots \dots \dots (3.25)$$

(3.23)式に(3.25)式を代入して整理すると次式が得られる。

$$\left(\begin{bmatrix} \delta h - \frac{\partial M}{\partial P} & l - \delta v \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} + \frac{1}{K_v} [K] \cdot [T] \cdot \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix} \\ = \left([K] \cdot [T] + \begin{bmatrix} Q & -P \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \Delta \delta v \\ \Delta \delta h \end{Bmatrix} \quad \dots \dots \dots (3.26)$$

(3.25)式は回転ばねの回転角及びせん断ばねの変形と積層ゴムの変形及び荷重の関係について、(3.26)式は積層ゴムの水平方向及び鉛直方向の荷重と変形の関係について、それぞれ増分の形で表したものである。ある計算ステップにおいて、荷重(P 、 Q)、変形(δh 、 δv)及びばねの変形と回転角(θ 、 δ_s)を既知とすると、(3.26)式より増分 ΔP 、 ΔQ 、 $\Delta \delta v$ 、 $\Delta \delta h$ のうち2つが既知であれば残り2つの増分が求められる。さらに、(3.25)式より $\Delta \theta$ 、 $\Delta \delta_s$ が求められ、次のステップの荷重と変形が確定する。なお、微係数 $\partial P_a / \partial \delta v_a$ 、 $\partial P_a / \partial \theta$ 、 $\partial M / \partial \theta$ 、 $\partial M / \partial P$ 、 $dQ_s / d\delta_s$ については、次項で定義するばね特性から求める。

3.3 ばね特性

本モデルで使用する回転ばね、せん断ばね、軸ばねの復元力特性を以下に定義する。

3.3.1 回転ばね特性^{3.6)}

回転ばねの弾性剛性は、Koh・Kelly のモデルにおいてせん断ばねを無限大とした場合の座屈荷重を、梁のせん断変形を無視した Euler の座屈荷重に等しくおき、さらに中間鋼板が剛であると仮定することにより、次式で与えられる^{3.4)}。

$$K_R = \frac{\pi^2 E'_b I}{h} \quad \dots \dots \dots (3.27)$$

E'_b は曲げに関する見かけの縦弾性係数、 I は積層ゴムの断面 2 次モーメントである。円形断面の E'_b の評価式としては、理論式^{3.11)}にゴムの圧縮性を考慮して修正された次式^{3.12)}が提案されている。

$$E'_b = \frac{1}{\frac{1}{E_\infty} + \frac{1}{(1 + 2/3 \cdot \kappa \cdot S_1^2) \cdot E}} \quad \dots \dots \dots (3.28)$$

ここで、 E はゴムの縦弾性係数、 E_∞ はゴムの体積弾性係数、 κ はゴム硬度によって定められる補正係数、 S_1 は積層ゴムの 1 次形状係数 ($S_1 = D/4t_r$ 、 D : 直径、 t_r : ゴム 1 層厚) である。

回転ばねの非線形特性は以下の仮定に基づいて設定した。図 3.3 に示すような両端が剛なプレートに接着された円形断面のゴムシートに、圧縮荷重と曲げモーメントが作用した場合を考える。断面は平面を保持するものと仮定する。曲げによって生じる断面内の垂直応力度と垂直ひずみ度の関係には、図 3.4 のような圧縮側で常に弾性、引張り側で完全弾塑性を仮定する。このような応力-ひずみ関係を仮定することにより、曲げモーメントの変化に対して断面内の応力分布が変化する。ここで、断面に圧縮荷重のみが作用している状態（図 3.3(a)）から、曲げモーメントが作用し、引張り側縁応力度が降伏応力度 σ_y に達する時の曲げモーメントを降伏曲げモーメントと定義する（図 3.3(b)）。さらに、曲げモーメントが大きくなると、図 3.3(c) に示す状態を経て、全断面が引張り降伏し圧縮縁の 1 点で集中荷重として抵抗する状態となる（図 3.3(d)）。このときの曲げモーメントを終局曲げモーメントと定義する。(3.4)式に対応させるため、積層ゴムの両固定端モーメントの和として表すと、降伏曲げモーメント M_y と終局曲げモーメント M_u は次式で与えられる。

$$M_y = 2 \times \frac{\pi D^3}{32} (\sigma - \sigma_y) \quad \dots \dots \dots (3.29)$$

$$M_u = 2 \times \frac{D}{2} \frac{\pi D^2}{4} (\sigma - \sigma_y) = 4 \cdot M_y \quad \dots \dots \dots (3.30)$$

ここで、 σ は面圧、 σ_y は引張り降伏応力（ $\sigma_y < 0$ ）である。

以上より、回転ばねの復元力特性を次式で与えることとする。

・降伏前

$$\frac{M}{M_y} = \frac{\theta}{\theta_y} \quad \left(\frac{\theta}{\theta_y} \leq 1 \right) \quad \dots \dots \dots (3.31)$$

θ_y は降伏回転角で次式を満足する。

$$M_y = K_R \theta_y \quad \dots \dots \dots (3.32)$$

・降伏後

$\theta = \theta_y$ のとき $M = M_y$ 及び $\partial M / \partial \theta = K_R$ 、 $\theta \rightarrow \infty$ のとき $M \rightarrow M_u$ 及び $\partial M / \partial \theta \rightarrow 0$ を満足する関数の一つとして、以下の双曲線関数を選定した。

$$\frac{M}{M_y} = 4 - \frac{3}{\left\{ 1 + \frac{r}{3} \left(\frac{\theta}{\theta_y} - 1 \right) \right\}^{\frac{1}{r}}} \quad \left(\frac{\theta}{\theta_y} > 1 \right) \quad \dots \dots \dots (3.33)$$

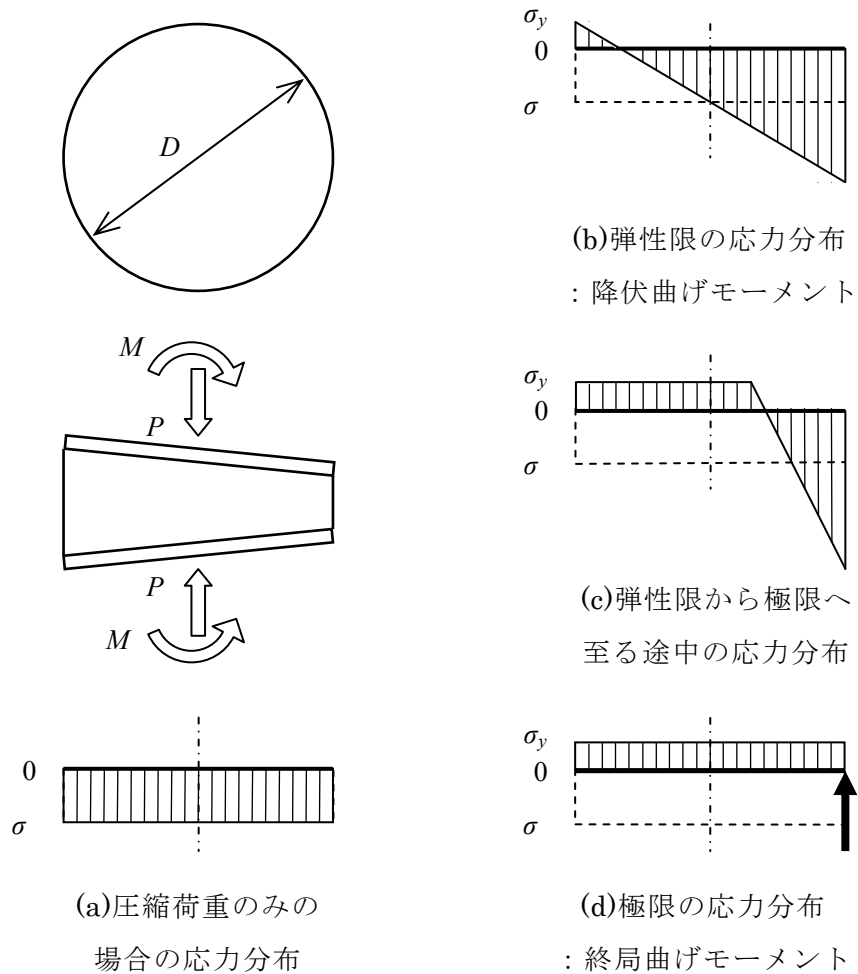


図 3.3 圧縮荷重と曲げを受けるゴムシートの応力分布

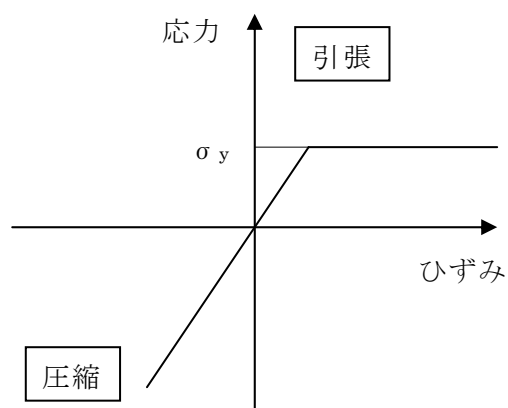


図 3.4 ゴムの応力-ひずみ関係の概要

ここで、 r は曲線形状を規定する関数パラメータである。図 3.5 に回転ばねの復元力特性の概要を示す。(3.31)、(3.33)式を θ 及び P で微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial M}{\partial \theta} = K_R \quad \left(\frac{\theta}{\theta_y} \leq 1 \right) \quad \dots \dots \dots (3.34)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \theta} = \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{r}{3} \left(\frac{\theta}{\theta_y} - 1 \right) \right\}^{\frac{1+r}{r}}} K_R \quad \left(\frac{\theta}{\theta_y} > 1 \right) \quad \dots \dots \dots (3.35)$$

$$\frac{\partial M}{\partial P} = 0 \quad \left(\frac{\theta}{\theta_y} \leq 1 \right) \quad \dots \dots \dots (3.36)$$

$$\frac{\partial M}{\partial P} = \frac{D}{4} \left(\frac{M}{M_y} - \frac{1}{K_R} \frac{\theta}{\theta_y} \frac{\partial M}{\partial \theta} \right) \quad \left(\frac{\theta}{\theta_y} > 1 \right) \quad \dots \dots \dots (3.37)$$

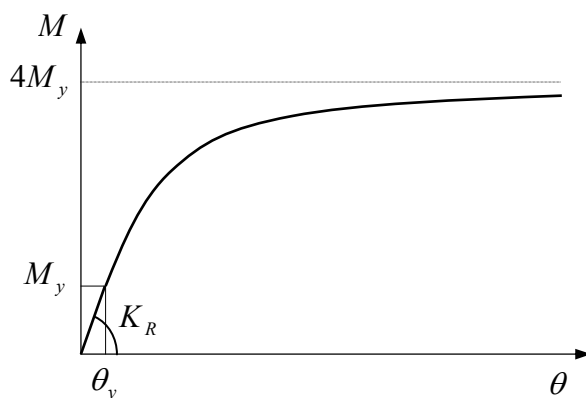


図 3.5 回転ばねの復元力特性

3.3.2 セン断ばね特性^{3.6)}

せん断ばねの復元力特性は、圧縮荷重がない時の積層ゴムの水平力－水平変形曲線で表すこととした。圧縮荷重ゼロにおいて水平方向に単調载荷を受ける積層ゴムの水平力－水平変形曲線は、せん断ひずみ（水平変形／ゴム総厚）200%程度までは概ね線形で、それ以上の変形領域では若干のハードニングが生じることが一般的な特徴である。そのような特性を表現し得る関数として以下のべき関数を採用した。

$$Q_s = GA \left\{ 1 + s_1 \left(\frac{\delta_s}{h} \right)^{s_2} \right\} \left(\frac{\delta_s}{h} \right) \quad \dots \dots \dots (3.38)$$

ここで、 s_1 はハードニング開始位置を制御するパラメータ、 s_2 はハードニング強さを制御するパラメータである。図 3.6 にせん断ばねの復元力特性の概要を示す。(3.38) 式を微分すると次式が得られる。

$$\frac{dQ_s}{d\delta_s} = \left\{ 1 + s_1 (1 + s_2) \left(\frac{\delta_s}{h} \right)^{s_2} \right\} \frac{GA}{h} \quad \dots \dots \dots (3.39)$$

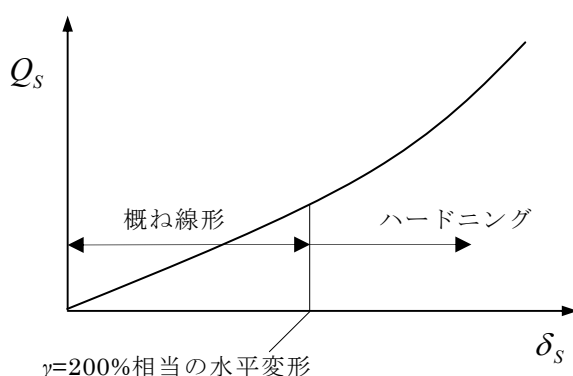


図 3.6 せん断ばねの復元力特性

3.3.3 軸ばね特性 ^{3.13)}

積層ゴム断面が降伏モーメントより大きいモーメントを受けると、中立軸が図心からずれるため、図心位置での軸変形は伸び変形成分を含むことになる。そこで、軸ばねの復元力特性には、この曲げによる図心の伸び変形成分を考慮した特性を与えた。図 3.7 に軸ばねの復元力特性を示す。弾性剛性 K_{VC} は次式で与えられる。

$$K_{VC} = \frac{E'_C A}{h} \quad \dots \dots \dots (3.40)$$

ここで、 E'_C は圧縮に関する見かけの縦弾性係数、 A は積層ゴムの断面積である。 E'_C は次式で表される ^{3.14)}。

$$E'_C = \frac{1}{\frac{1}{E_\infty} + \frac{1}{(1 + 2 \cdot \kappa \cdot S_1^2) \cdot E}} \quad \dots \dots \dots (3.41)$$

図 3.3 のゴムシートに鉛直荷重 P_a と曲げモーメント M を作用させた状態を考える。
全断面の応力度が弾性域にある状態から回転角 θ を一定に保持したまま P_a を減少させていくと、応力分布が図 3.3(b) の「弾性限の応力分布」の状態になる（図 3.7 の点 Y）。点 Y の荷重 $P_{a,y}$ は、(3.29)、(3.32) 式より次式で与えられる。

$$P_{a,y} = \frac{4}{D} K_R \theta + P_{a,u} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3.42)$$

ここで、 $P_{a,u}$ は終局荷重で、次式で定義される。

$$P_{a,u} = A \sigma_y \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3.43)$$

また、点 Y における鉛直変形は次式である。

$$\delta v_{a,y} = \frac{P_{a,y}}{K_{VC}} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3.44)$$

点 Y から θ を一定に保持したままさらに P_a を減少させていくと、全断面が σ_y に達し、応力分布は図 3.3(d) の「極限の応力分布」の状態になる（図 3.7 の点 U）。点 U と点 Y を結ぶ直線の勾配を K_{VC}/a とすると、点 U の鉛直変形 $\delta v_{a,u}$ は次式で与えられる。

$$\delta v_{a,u} = \delta v_{a,y} - \frac{a}{K_{VC}} (P_{a,y} - P_{a,u}) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3.45)$$

a は定数 ($a > 1$) で、降伏から終局に至るまでの遷移状態を規定している。以上より、軸ばねの復元力特性を次式で与えることとした。

・ 点 Y 以上の圧縮荷重域

$$P_a = K_{VC} \delta v_a \quad (\delta v_{a,y} \leq \delta v_a) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3.46)$$

・ 点 Y ～ 点 U

$\delta v_a = \delta v_{a,y}$ のとき $P_a = P_{a,y}$ 、 $\partial P_a / \partial \delta v_a = K_{VC}$ 及び $\delta v_a = \delta v_{a,u}$ のとき $P_a = P_{a,u}$ 、 $\partial P_a / \partial \delta v_a = 0$ を満足する最も簡単な関数として次式を選定した。

$$\frac{P_a - P_{a,u}}{P_{a,y} - P_{a,u}} = \left(\frac{\delta v_a - \delta v_{a,u}}{\delta v_{a,y} - \delta v_{a,u}} \right)^a \quad (\delta v_{a,u} \leq \delta v_a \leq \delta v_{a,y}) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3.47)$$

(3.46)、(3.47) 式を δv_a 及び θ で微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial P_a}{\partial \delta v_a} = K_{VC} \quad (\delta v_{a,y} \leq \delta v_a) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3.48)$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial \delta v_a} = \left(\frac{\delta v_a - \delta v_{a,u}}{\delta v_{a,y} - \delta v_{a,u}} \right)^{a-1} K_{VC} \quad (\delta v_{a,u} \leq \delta v_a \leq \delta v_{a,y}) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3.49)$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial \theta} = 0 \quad (\delta v_{a,y} \leq \delta v_a) \quad \dots \dots \dots (3.50)$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial \theta} = \frac{1}{\theta} \left\{ P_a - P_{a,u} - \left(\delta v_a - \frac{P_{a,u}}{K_{VC}} \right) \frac{\partial P_a}{\partial \delta v_a} \right\} \quad (\delta v_{a,u} \leq \delta v_a \leq \delta v_{a,y}) \quad \dots \dots \dots (3.51)$$

以上の定義によれば、軸ばね特性の適用範囲は、積層ゴムに引張り力が生じて全断面が σ_y に達する状態まで、すなわち、図 3.7 に示した圧縮領域から点 Y を経て点 U までとなる。よって、積層ゴムに引張り変形が生じてても、面圧が引張り降伏面圧以下であれば解析が可能である。

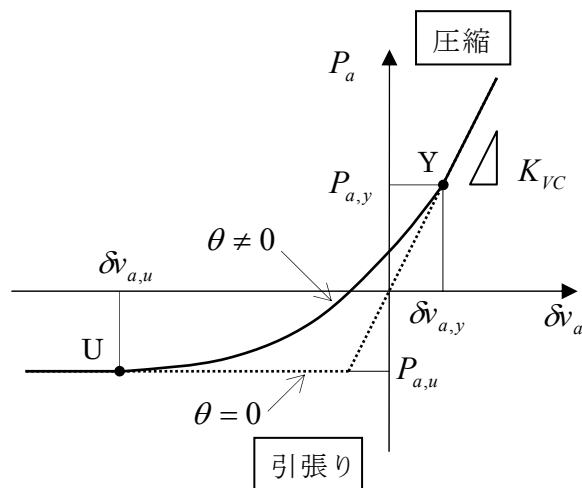


図 3.7 軸ばねの復元力特性

3.4 数値解析

3.4.1 検証実験^{3.8)}

試験体：修正マクロモデルの精度を検証するため、積層ゴム単体の大変形加力実験に対する数値解析を実施した。試験体の形状を図 3.8 に、諸元を表 3.1 に、ゴム材料の物性規格を表 3.2 にそれぞれ示す。試験体は直径 D が 200mm の縮小試験体で、せん断弾性係数が 0.392MPa の天然ゴム系積層ゴムである。ゴム総厚 h が 50mm、ゴム 1 層厚 t_r が 2.0mm で、1 次形状係数 S_1 及び 2 次形状係数 S_2 はそれぞれ 25 及び 4 である。

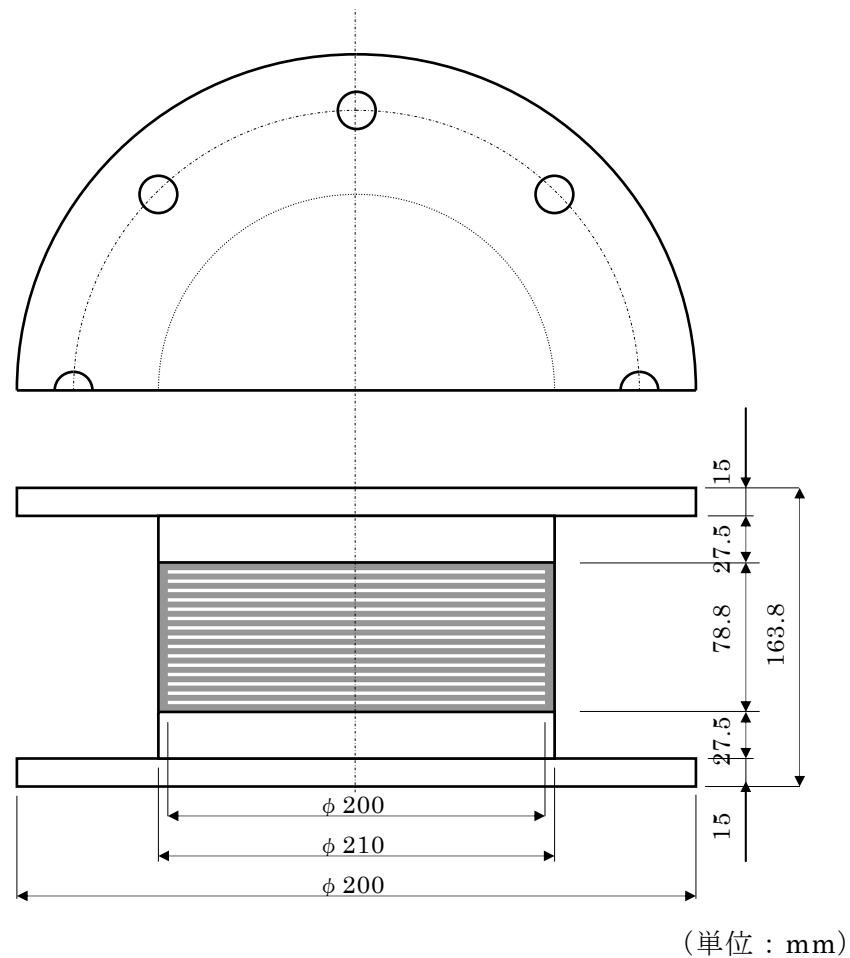


図 3.8 積層ゴムの形状・寸法

表 3.1 試験体の諸元

外径 D	(mm)	200
内径	(mm)	0.0
全高さ l	(mm)	78.8
ゴム 1 層厚 t_r	(mm)	2.0
ゴム層数		25
ゴム総厚 h	(mm)	50
中間鋼板厚	(mm)	1.2
1 次形状係数 S_1		25
2 次形状係数 S_2		4.0

表 3.2 ゴム材料の物性規格

硬度 (JIS A)	(度)	37±5
100%伸長応力	(MPa)	0.8±0.2
引張強度	(MPa)	17 以上
破断伸び	(%)	600 以上
せん断弾性係数 G	(MPa)	0.392
縦弾性係数 E	(MPa)	2.2
体積弾性係数 E_∞	(MPa)	1200
ゴム硬度による補正係数 κ		0.85
降伏応力 σ_y	(MPa)	-1.5

加力方法：実験は、鉛直荷重一定下で水平方向に載荷する「一定荷重載荷」と、鉛直荷重を変動させた状態で水平方向に載荷する「変動荷重載荷」に分けて実施した。水平方向はいずれも単調載荷とした。試験ケースの一覧を表 3.3 に示す。一定荷重載荷では、面圧を 0、9.81、19.6MPa の 3 ケースとして、せん断ひずみを 0 から 400%まで増加させた。変動荷重載荷では、面圧をせん断ひずみに応じて線形的に変動させた。変動荷重の与え方を図 3.9 に示す。せん断ひずみの変動範囲は 0 から 350%、面圧の変動範囲は 0 から 19.6MPa とした。加力は図 3.10 に示す加力装置（鉛直アクチュエータ 1000kN×2、水平アクチュエータ 500kN）を用いて行い、いずれのケースについても静的に加力を行った。

表 3.3 試験ケース一覧

ケース名	実験種類	せん断ひずみ γ (%)	面圧 σ (MPa)
ケース①	一定荷重載荷	0～400	0
ケース②		0～400	9.81
ケース③		0～400	19.6
ケース④	変動荷重載荷	0～350	0～19.6
ケース⑤		0～350	0～19.6
ケース⑥		0～350	0～19.6

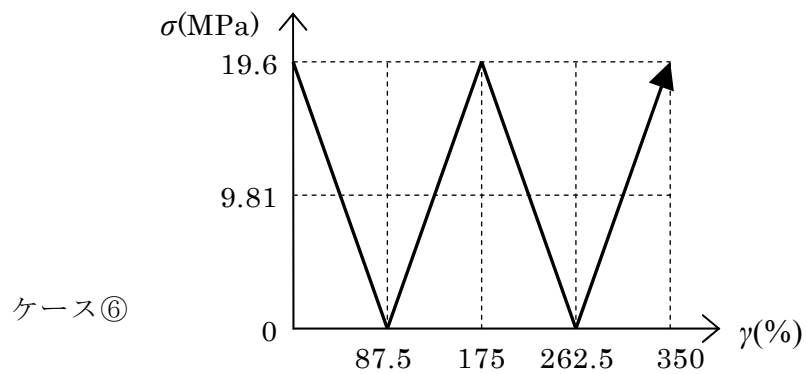
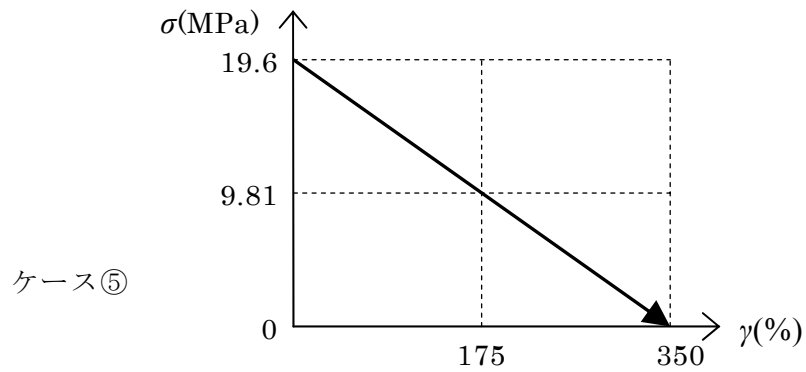
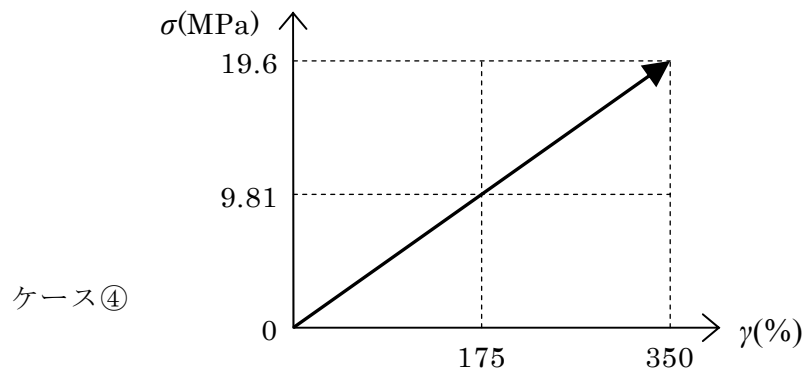


図 3.9 変動荷重の与え方

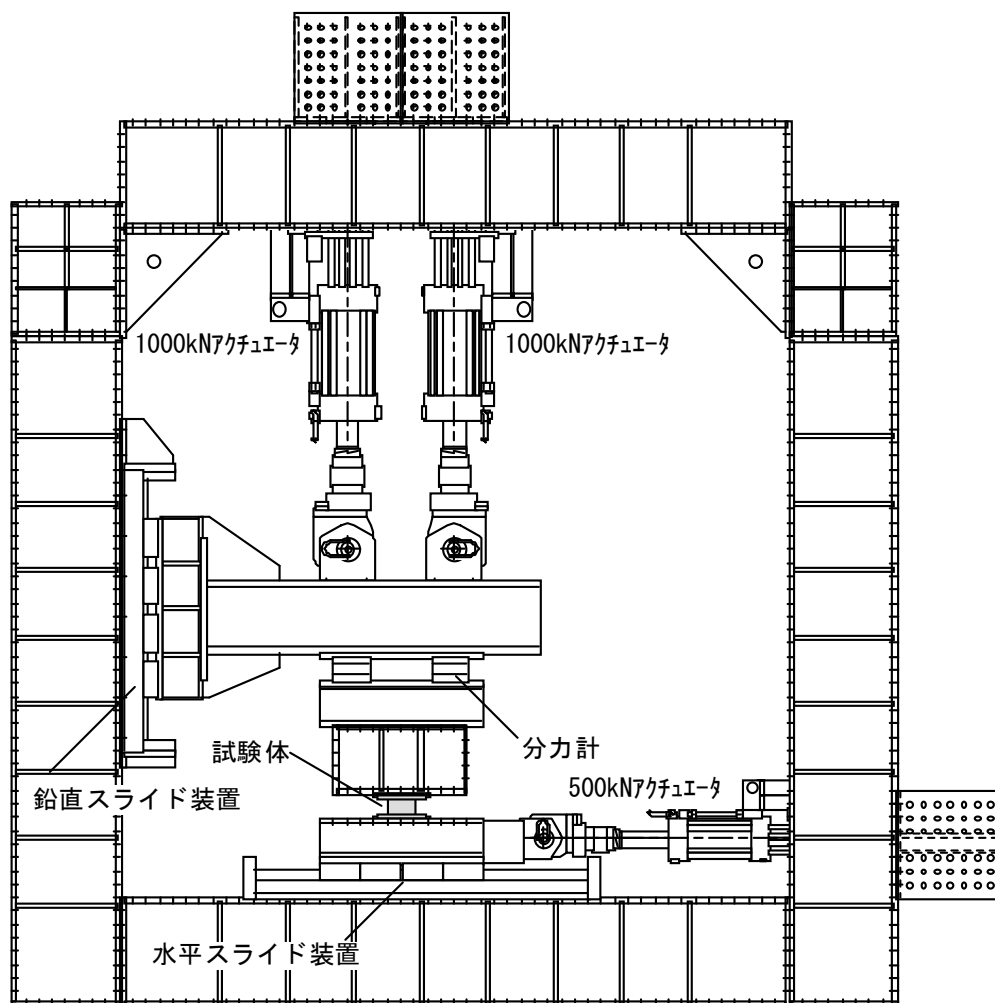


図 3.10 加力装置

3.4.2 解析条件

解析に用いた積層ゴムの形状及びゴム材料の弾性定数等は、表 3.1、3.2 に示す通りである。せん断ばねの復元力特性を規定するパラメータ s_1 、 s_2 、回転ばねの復元力特性を規定するパラメータ r 並びに軸ばねの復元力特性を定めるパラメータ a については、実験結果に基づき以下の通り定めることとした。

せん断ばね：圧縮荷重がない時の水平力－水平変形曲線で表すことを考慮し、ケース①（一定荷重、面圧 0）の水平力－水平変形曲線とよく一致するように s_1 及び s_2 を決定した。図 3.11 に、(3.38)式による実験結果のフィッティング結果を示す。 s_1 が小さくなるとハードニング開始位置が大きくなり、 s_2 が大きくなるとハードニングが強くなることを考慮し、 s_1 及び s_2 としては 0.001 及び 5 を与えた。

回転ばね：修正マクロモデルの曲げモーメントとせん断力の釣り合い（前掲(3.4)、(3.5)式）に、実験結果を代入することによって曲げモーメント－回転角曲線を求め、それに合致するように r を決定した。(3.5)式を θ について解くと次式が得られる。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{Q_s}{\sqrt{P^2 + Q^2}} - \tan^{-1} \frac{Q}{P} \quad \dots \dots \dots (3.52)$$

(3.4)式を再掲すると、

$$M = P\delta h + Q(l - \delta v) \quad \dots \dots \dots (3.53)$$

(3.52)、(3.53)式に、ケース②及びケース③の実験結果から得られた Q 、 P 、 δh 、 δv を、 Q_s としてケース①に合致するようにパラメータを定めた(3.38)式をそれぞれ代入すると、ケース②とケース③についての $M - \theta$ 曲線が求められる。図 3.12 に、得られた $M - \theta$ 曲線と(3.31)、(3.33)式によるフィッティングの結果を示す。ここでは、両ケースによく一致するように r として 1.9 を与えた。

軸ばね：ケース③の鉛直変形をシミュレートできるように a として 1.6 を与えた。

解析では、実験と同じように鉛直荷重と水平変形を既知として計算を進め、水平力と鉛直変形を求めた。また、解析時の水平変形の増分幅は 0.0125mm とした。

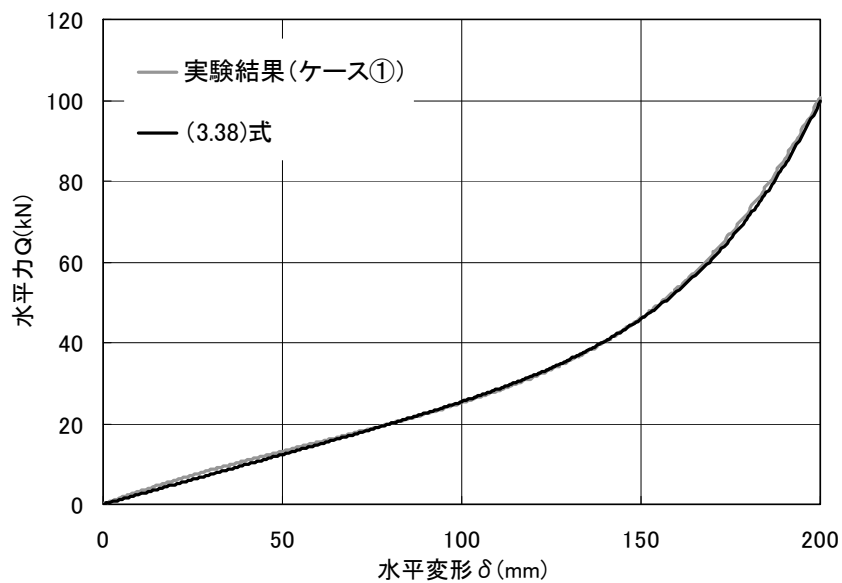


図 3.11 せん断ばね特性のフィッティング

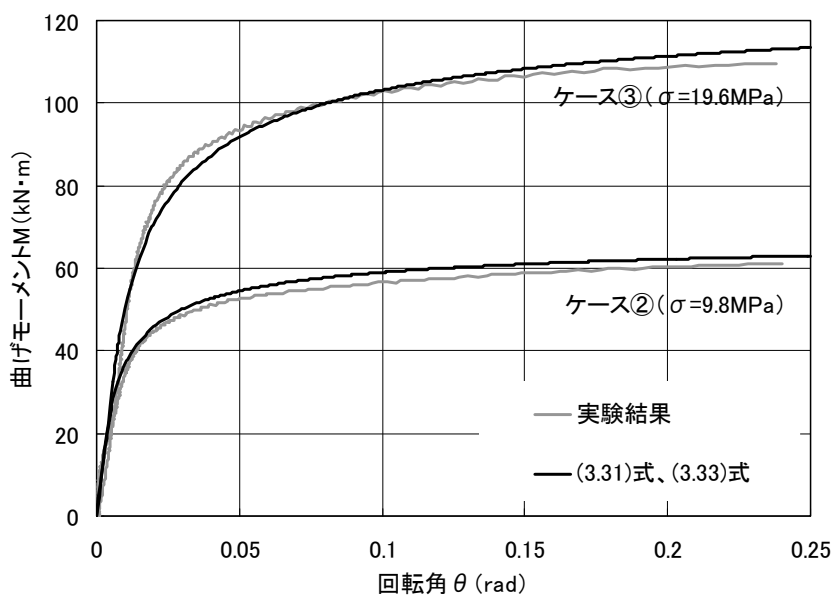


図 3.12 回転ばね特性のフィッティング

3.4.3 解析結果

図 3.13、3.14 に、一定荷重載荷のケース①～ケース③のせん断応力 τ （水平力／積層ゴム断面積）－せん断ひずみ γ 曲線及び鉛直ひずみ ε （鉛直変形／ゴム総厚）－せん断ひずみ γ 曲線について、解析結果と実験結果を比較して示す。これより、 τ － γ 曲線と ε － γ 曲線いずれについても、解析と実験は非常に良く一致している。 τ － γ 曲線では、ケース②とケース③において、 γ がそれぞれ 250%及び 350%を超えた付近において、 τ が頭打ちとなり負勾配が発生する様子が精度良く表現されている。また、 ε － γ 曲線においても γ の増大に伴い ε が低下していく様子がほぼ正確に表現されている。本解析では、軸ばねの復元力特性として、曲げによる図心の伸び変形成分を考慮した非線形特性を与えている。このようなばね特性を用いた本手法の有効性を確認するため、軸ばねを線形とした解析との比較を行った。図 3.15 に両者の ε － γ 曲線を示す。これより、ケース①では両者の違いは小さいが、面圧を与えたケース②及びケース③では、 γ が 200%付近から軸ばね線形の ε が急増し、 γ の増大に伴い両者の差が大きくなる。軸ばねを線形とした解析では、大変形域において沈み込み変形を過大に評価しており、軸ばねを非線形とした本手法が有効であることが分かる。

図 3.16、3.17 に、変動荷重のケース④～ケース⑥の比較結果を示す。これより、一定荷重のケースと同様、 τ － γ 曲線と ε － γ 曲線ともにに解析と実験は非常に良く一致しており、変動荷重に伴う τ と ε の変動が正確に表現されている。

本解析では、非線形ばねの復元力特性を規定するパラメータを一定荷重の実験結果に基づき決定している。よって、ケース①～ケース③において実験との合致度が高いのはある意味当然のことと言ってよい。しかし、変動荷重のケースも含めた全てのケースに対して、一組のパラメータによって精度良く実験結果をシミュレートできることを考慮すれば、積層ゴムを 3 つのばねと剛体要素で表した本モデルの基本的な考え方並びに各ばねの非線形特性を規定する関数形状の設定が、それぞれ妥当であることが分かる。

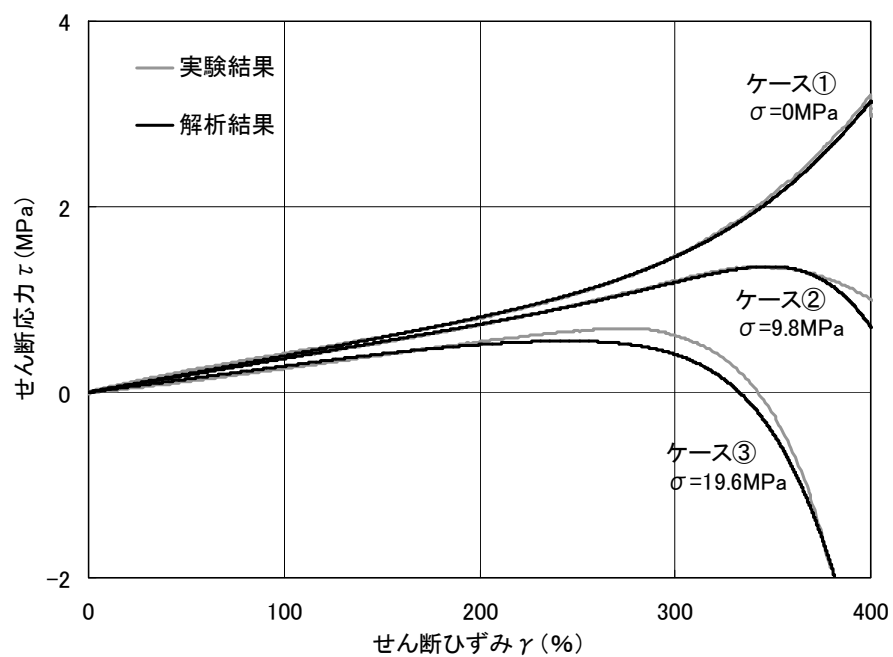


図 3.13 解析結果と実験結果の比較（ケース①～ケース③、せん断応力 τ ）

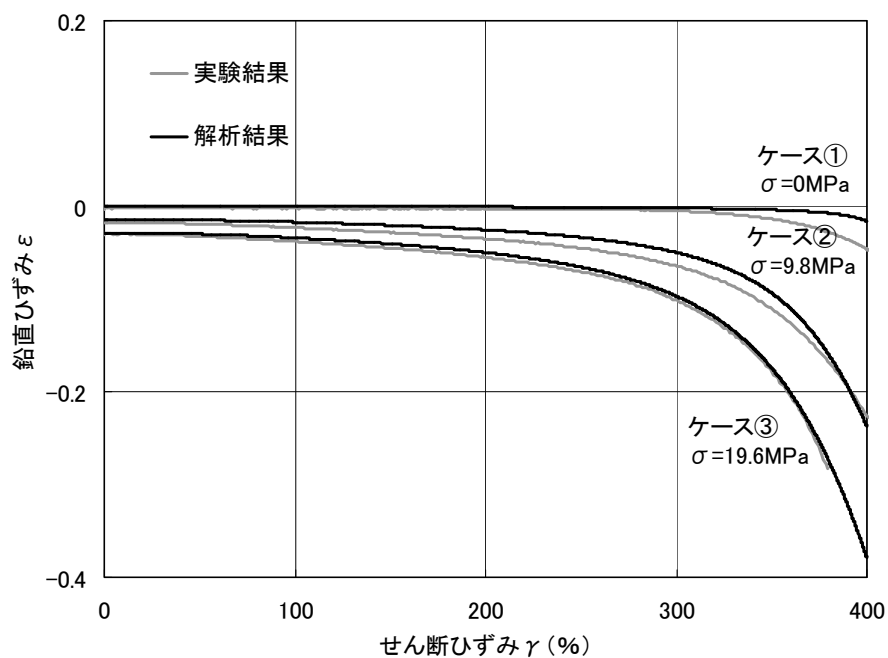


図 3.14 解析結果と実験結果の比較（ケース①～ケース③、鉛直ひずみ ε ）

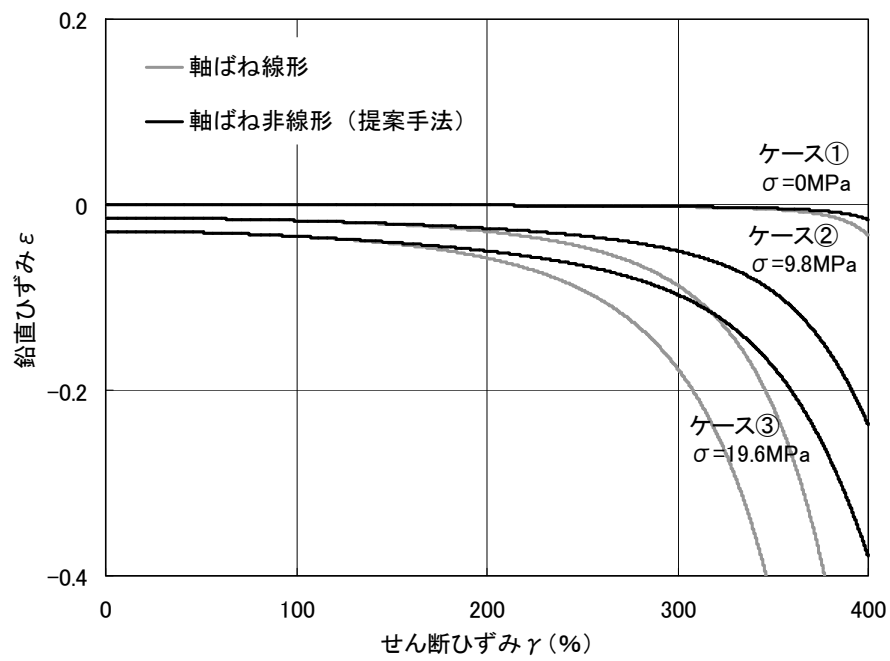


図 3.15 軸ばね非線形の効果（ケース①～ケース③、鉛直ひずみ ε ）

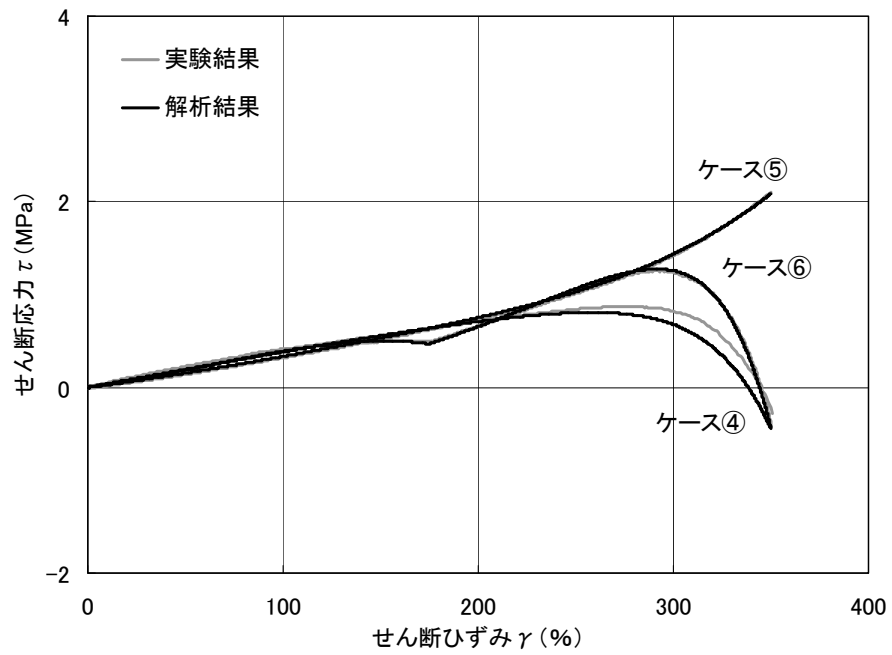


図 3.16 解析結果と実験結果の比較（ケース④～ケース⑥、せん断応力 τ ）

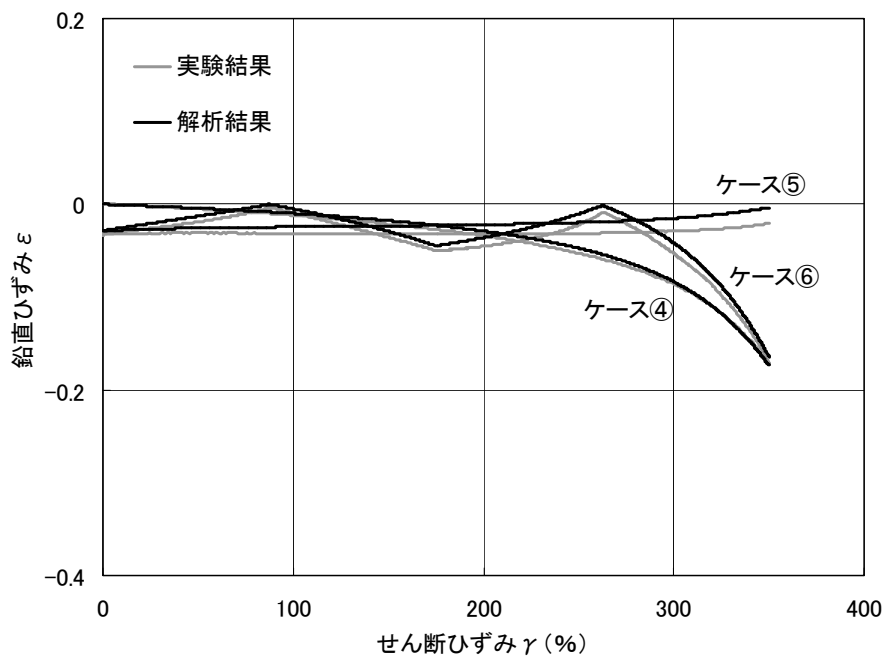


図 3.17 解析結果と実験結果の比較（ケース④～ケース⑥、鉛直ひずみ ε ）

3.5 まとめ

圧縮荷重を受ける積層ゴムの終局挙動を表現できるモデルとして、Koh-Kelly のモデルに幾何学的非線形と材料非線形を導入して拡張された大変形マクロモデルが提案されている。本章では、このモデルを地震応答解析への適用が可能な新規モデルに拡張するとともに、そのモデルの精度を確認するために、積層ゴム単体の実験の数値解析を実施した。本章から得られた知見は以下の通りである。

- (1) 従来の大変形マクロモデルは、せん断変形及び曲げ変形をそれぞれ 1 つに集約したせん断ばね及び回転ばね、高さを表す剛体要素によって積層ゴムを表したモデルであり、せん断ばねと回転ばねに適当な非線形関数を与えることによって、圧縮荷重下で大変形を受ける積層ゴムの非線形特性を表現することができる。しかしながら、軸方向のばねを持たないため鉛直剛性を評価することができず、地震応答解析に直接用いることができなかった。この問題点に対応するため、新たに非線形の軸ばねを追加した修正マクロモデルを考案した。
- (2) 修正マクロモデルの精度を検証するため、積層ゴム単体の大変形加力実験の数値解析を実施した。実験では、試験体として直径 200mm、せん断弾性係数 0.392MPa の天然ゴム系積層ゴム縮小試験体を用いて、一定荷重下及び変動荷重下で水平方向に単調載荷を与えた。解析結果と実験結果の比較より、一定荷重下の大変形域において、水平力が頭打ちとなり負勾配が発生する挙動並びに鉛直変形の沈み込み変形が増大する挙動が高精度に再現できた。また、変動荷重に伴う水平力と鉛直変形の変動も正確に表現できた。
- (3) 本解析では、各非線形ばねの復元力特性を規定するパラメータを与える必要がある。これらのパラメータは一定荷重の実験結果に基づき決定したため、解析と実験の合致度が高いのはある意味当然である。しかし、変動荷重のケースも含めた全てのケースに対して、一組のパラメータによって実験結果を高精度にシミュレートできること考慮すれば、積層ゴムを 3 つのばねと剛体要素で表した本モデルの基本的な考え方並びに各ばねの非線形特性を規定する関数形状の設定は、それぞれ妥当である。

第 3 章参考文献

- 3.1) 田中栄一、石田勝彦、水越薫、塩尻弘雄、竹中康雄、今野孝昭：免震システムの終局挙動を対象とした振動解析評価法の研究 その 1 折れ線型復元力モデルによる検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、1991.9.
- 3.2) 酒向裕司、竹中康雄、吉川和秀：積層ゴムの水平および上下の復元力モデル、日本建築関東支部研究報告集、1991.
- 3.3) 菊地優、猿田正明、田村和夫：建物免震用積層ゴムの復元力特性に関する研究、構造工学論文集 Vol.40B、pp.177-188、1994.3.
- 3.4) Koh, C. G. and Kelly, J. M.: A simple mechanical model for elastomeric bearings used in base isolation, Int. J. Mech. Sci., 30, pp.933-943, 1988.
- 3.5) 飯塚真巨：圧縮軸力・水平力同時作用下における免震用積層ゴムの大変形マクロモデル、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 B、pp.721-722、1992.8.
- 3.6) 日本建築学会編：免震構造設計指針第 2 版、pp.545-563、1993.
- 3.7) Iizuka, M.: A macroscopic model for predicting large-deformation behaviors of laminated rubber bearings, Engineering Structures, Vol.22, pp.323-334, 2000.
- 3.8) 高岡栄治、飯塚真巨、芳沢利和、鈴木重信、菊地隆志：変動圧縮軸力を受ける積層ゴムの力学挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.691-692、2000.9.
- 3.9) Haringx, J. A.: On highly compressible helical springs and rubber roads, and their application for vibration-free mountings, Philips Research Reports 4, pp.206-220, 1949.
- 3.10) 飯塚真巨、笠原康宏：水平変位を受ける積層ゴムの鉛直剛性評価法、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.781-782、1994.9.
- 3.11) Gent, A. N. and Meinecke, E. A.: Compression, bending, and shear of bonded rubber blocks, Polymer Engineering and Science, Vol.10, No.1, pp.48-53, 1970.
- 3.12) 藤田聡、藤田隆史：重量機器免震用積層ゴムの静的加力実験 ー第 3 報 剛性についての理論的検討ー、生産研究、第 38 巻 4 号、pp.189-191、1986.4.
- 3.13) 飯塚真巨：積層ゴムの大変形挙動をシミュレートする巨視的力学モデル、日本建築学会構造系論文集、第 568 号、pp.83-90、2003.6.
- 3.14) Gent, A. N. and Lindley, P. B.: The compression of bonded rubber blocks, Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 173, No. 3, pp.111-117, 1959.

第4章 積層ゴムの大変形せん断履歴則

4.1 はじめに

積層ゴムが繰り返し大変形を受ける場合、その水平復元力特性には、ハードニングや大変形経験後の繰り返しによる剛性低下並びに除荷時の履歴ループの膨らみ等の強い非線形特性が現れる^{4.1)}。よって、大変形域を含めた免震建物の地震応答解析を実施するためには、このような繰り返しの影響を積層ゴムモデルに考慮する必要がある。第3章で提示した修正マクロモデルは、単調載荷時の大変形挙動を表すものであり、繰り返しの影響を表現することができない。これは、せん断ばね特性として(3.38)式で表される履歴未考慮の関数を用いているためである。そこで、繰り返し大変形を受ける積層ゴムの挙動を表すため、修正マクロモデルのせん断ばね特性として、積層ゴムの履歴を考慮した関数を適用することとした。この場合、積層ゴムの大変形域における複雑な水平力-水平変形曲線を精度よく表現するせん断履歴則が必要となる。既往のせん断履歴則としては、折れ線モデル^{4.2)}、**Rate** モデル^{4.3)~4.5)}等が提案されている。折れ線モデルは、直線で構成されているため、極めて単純で分かりやすく実用的である。しかしながら、積層ゴムの加力実験結果と比較すると、大変形域において若干の隔たりがある。一方、曲線モデルである **Rate** モデルは、適切にパラメータを設定することにより、積層ゴムの大変形加力実験結果とほぼ一致させることができる。しかしながら、**Rate** モデルの基本構成式は微分方程式で記述されており、難解で直感的な理解を阻害している面もある。

そこで本章では、簡単な曲線式で構成した大変形を受ける積層ゴムのせん断履歴則を提案する。そして、本履歴則の有効性を検証するために、積層ゴム単体の大変形加力実験の数値解析を行った。さらに、本履歴則を修正マクロモデルのせん断ばねに適用し、圧縮荷重下における積層ゴムの終局挙動解析も実施した。なお、本章でも第2章と同じく、減衰を持たない天然ゴム系積層ゴムを対象として議論を進める。

4.2 大変形せん断履歴則

4.2.1 履歴則の概要

図 4.1 に示すような 4 つの曲線を定義し、これらの曲線の組合せによって積層ゴムの水平復元力特性を表すことを考える。なお、以下では、水平力－水平変形曲線をせん断応力 τ －せん断ひずみ γ 曲線（ τ =水平力／積層ゴム断面積、 γ =水平変形／ゴム総厚）に置換して検討を進める。各曲線の定義は以下の通りである。

- ・ スケルトン曲線：せん断ひずみゼロから単調载荷して得られる曲線
- ・ 下限曲線：全ての履歴曲線がとり得る下限を規定する曲線
- ・ 除荷曲線：スケルトン曲線から除荷したときの曲線
- ・ 負荷曲線：除荷曲線から再び载荷したときの曲線

図 4.1 に従って基本的な履歴則を以下に説明する。

- ①せん断ひずみゼロからの载荷時はスケルトン曲線上を上昇する。
- ②スケルトン曲線上の点 A から除荷する場合は、下限曲線に漸近する除荷曲線上を下降する。
- ③除荷曲線上の点 B から载荷する場合は、点 A と点 B を通る負荷曲線上を上昇する。さらに、点 A を超えた場合は、スケルトン曲線上を上昇する。
- ④負荷曲線上の点 C から除荷する場合は、負荷曲線上をそのまま下降する。さらに点 B を超えた場合は、除荷曲線上を下降する。
- ⑤さらに除荷され、せん断ひずみが負になった場合、負側のスケルトン曲線上を移動する。

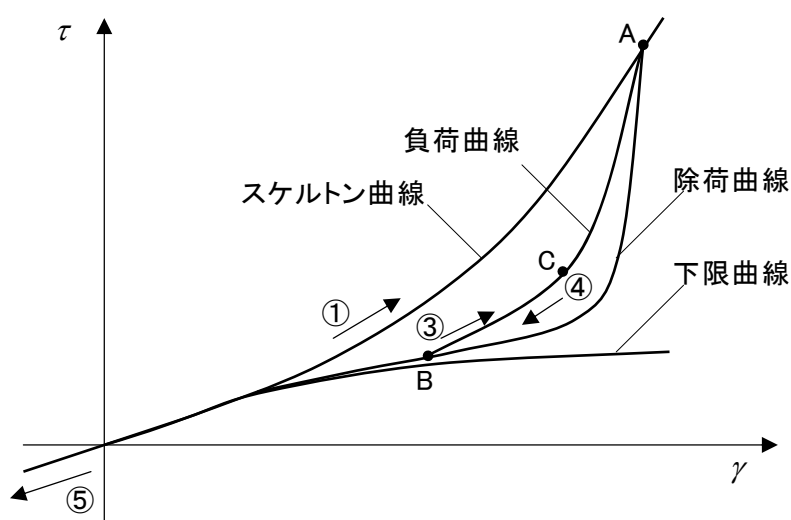


図 4.1 各曲線の定義

4.2.2 各曲線の定式化

以下、各曲線の定式化を示す。また、修正マクロモデルに適用する際には微係数が必要となるため、各曲線の微係数についても併せて示す。

(1) スケルトン曲線

繰り返し加力を受ける積層ゴムの τ - γ 曲線は一般的に以下の特徴を有する。

- ・ せん断ひずみが 200%程度以下では概ね線形で、それ以上の変形域ではハードニングが生じる。
- ・ 大変形を経験すると、次の繰り返しではその経験した最大せん断ひずみに応じてせん断剛性（ τ - γ 曲線全体の傾き）が低下する。

以上を考慮して、スケルトン曲線 τ_{skl} を次のべき関数によって表した。

$$\text{初期： } \tau_{skl}(\gamma) = G(\gamma + s_1 \gamma^{s_2+1}) \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

$$\text{更新後： } \tau_{skl}(\gamma) = G\gamma \quad (\gamma \leq \gamma_s) \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

$$\tau_{skl}(\gamma) = G(\gamma + s_1(\gamma - \gamma_s)^{s_2+1}) \quad (\gamma > \gamma_s) \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

ここで、 G ：ゴムのせん断弾性係数

s_1 ：ハードニング開始位置を制御するパラメータ

s_2 ：ハードニング強さを制御するパラメータ

γ_s ：ハードニング部分のシフト量

(4.2)、(4.3)式は経験した最大せん断ひずみに応じてせん断剛性が低下する性質を表現したもので、(4.1)式と比較するとハードニングを表す項が γ_s だけ横にシフトした形になっている。 γ_s は経験した最大せん断ひずみに応じて以下のように与えた。

$$\gamma_s = s_3 \cdot (\gamma_{\max} - 2) \quad \dots \dots \dots (4.4)$$

ここで、 s_3 ：ハードニングシフトの程度を制御するパラメータ

γ_{\max} ：最大経験せん断ひずみ

γ_{\max} の初期値としては 2 を与えた。 γ_{\max} が 2 を超えない範囲では(4.1)式を用いるが、 γ_{\max} が 2 を超えると更新後のスケルトン曲線(4.2)、(4.3)式を用いる。更新のタイミングは γ_{\max} から除荷した後、せん断ひずみの符号が反転した時点とした。

(4.1)式～(4.3)式を微分すると次式が得られる。

$$\text{初期： } \frac{d\tau_{skl}(\gamma)}{d\gamma} = G\{1 + s_1 \cdot (s_2 + 1) \cdot \gamma^{s_2}\} \quad \dots \dots \dots (4.5)$$

$$\text{更新後} : \frac{d\tau_{skl}(\gamma)}{d\gamma} = G \quad (\gamma \leq \gamma_s) \quad \dots \dots \dots (4.6)$$

$$\frac{d\tau_{skl}(\gamma)}{d\gamma} = G \left\{ 1 + s_1 \cdot (s_2 + 1) \cdot (\gamma - \gamma_s)^{s_2} \right\} \quad (\gamma > \gamma_s) \quad \dots \dots \dots (4.7)$$

(2) 下限曲線

積層ゴムに大きなせん断ひずみを与えた状態から除荷する場合、一般的に、以下の3つの領域を経てせん断ひずみゼロに戻る。

- ・ 高いせん断剛性でせん断応力が急激に低下する
- ・ せん断剛性がほぼゼロになってせん断ひずみだけが戻る
- ・ せん断ひずみが 200%程度以下において載荷時の初期せん断剛性に復帰する

下限曲線 τ_{low} は後者 2 つの領域をトレースするような曲線として設定することとし、Hardin-Drnevich モデルに曲率制御ができるように修正した以下の双曲線関数によって表した。図 4.2 に下限曲線を示す。

$$\tau_{low}(\gamma) = \frac{G \cdot \gamma}{\left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_l} \right)^{s_4} \right\}^{\frac{1}{s_4}}} \quad \dots \dots \dots (4.8)$$

ここで、 $\gamma_l = \frac{\tau_l}{G}$: $\tau = G\gamma$ と $\tau = \tau_l$ が交わる点のせん断ひずみ

τ_l : 応力漸近値

s_4 : 関数形状の曲率を制御するパラメータ

図 4.2 に示すように、 s_4 を大きくすることにより曲線の曲率を制御することができる。

(4.8)式を微分すると次式が得られる。

$$\frac{d\tau_{low}(\gamma)}{d\gamma} = G \cdot \left[\left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_l} \right)^{s_4} \right\}^{-1/s_4} - \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_l} \right)^{s_4} \right\}^{-1/s_4 - 1} \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_l} \right)^{s_4} \right] \quad \dots \dots \dots (4.9)$$

繰り返し加力を受ける積層ゴムの除荷時の履歴ループは、除荷時のせん断ひずみが大きくなるに従い下方へ大きく膨らみ、その面積が大きくなる傾向が認められる。この現象をシミュレートするために、スケルトン曲線からの除荷開始時のせん断ひずみ γ_{unl} に応じた低減率を初期の下限曲線に乗じることによって、下限曲線の勾配を更新した。一般にせん断ひずみが 200%程度までは線形的な挙動を示すことを考慮して、

低減率 r を次の形で表した。

$$r = 1 \quad (\gamma_{unl} < 2) \quad \dots \dots \dots (4.10)$$

$$r = 1 - s_5(\gamma_{unl} - 2) \quad (\gamma_{unl} \geq 2) \quad \dots \dots \dots (4.11)$$

ここで、 s_5 は低下の程度を制御するパラメータである。下限曲線の更新のタイミングはスケルトン曲線からの除荷が生じた時点とした。

(3) 偏差応力の導入

除荷曲線及び負荷曲線の取り扱いを簡単にするために、下限曲線をせん断応力の原点とした次の偏差応力を導入した。

$$\tilde{\tau} = \tau - \tau_{low} \quad \dots \dots \dots (4.12)$$

ここで、 τ : 真の応力、 $\tilde{\tau}$: 偏差応力

図 4.1 を偏差応力を用いて描き直すと図 4.3 のようになる。(4.12)式の定義から、偏差応力座標系におけるスケルトン曲線 $\tilde{\tau}_{skl}$ は次式で表される。

$$\tilde{\tau}_{skl}(\gamma) = \tau_{skl}(\gamma) - \tau_{low}(\gamma) \quad \dots \dots \dots (4.13)$$

以下では、偏差応力を用いて除荷曲線及び負荷曲線を定式化する。

(4) 除荷曲線

偏差応力座標系における除荷曲線 $\tilde{\tau}_{unl}$ は、図 4.3 に示すように、原点と点 A を通り、原点での接線勾配がゼロの曲線でなければならない。これらの条件を表すもっとも単純な関数として次式を設定した。

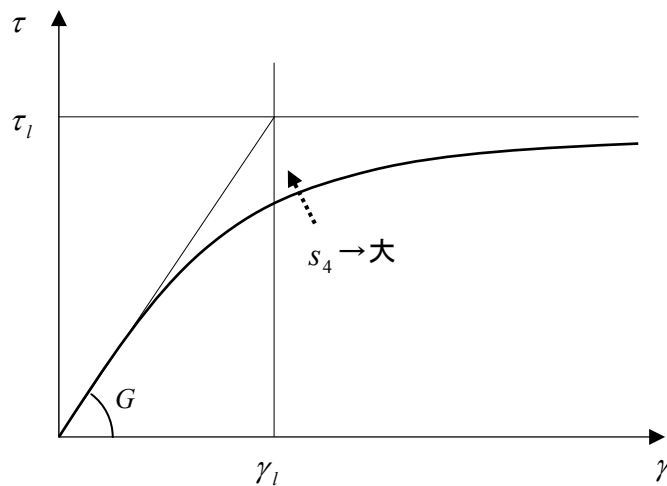


図 4.2 下限曲線

$$\tilde{\tau}_{unl}(\gamma) = b \cdot \gamma^{s_6} \quad \dots \dots \dots (4.14)$$

$$b = \frac{\tilde{\tau}_A}{\gamma_A^{s_6}} = \frac{\tilde{\tau}_{skl}(\gamma_A)}{\gamma_A^{s_6}} \quad \dots \dots \dots (4.15)$$

ここで、 s_6 は関数形状を制御するパラメータであり、図 4.3 に示すように s_6 を大きくすることによって曲線の曲率を制御することができる。また、 b は点 A を通るという条件を用いて自動的に決定される。

(4.14)式を微分すると次式が得られる。

$$\frac{d\tilde{\tau}_{unl}}{d\gamma} = s_6 \cdot b \cdot \gamma^{s_6-1} \quad \dots \dots \dots (4.16)$$

(5) 負荷曲線

偏差応力座標系における負荷曲線 $\tilde{\tau}_{rel}$ は、図 4.4 に示すように、点 B からスケルトン曲線と除荷曲線の間を通り点 A に向かう曲線である。既往の積層ゴムの加力実験で得られた知見より、負荷曲線は以下の特徴を有する。

- ・ 除荷直後に載荷する場合の負荷曲線は除荷曲線にほぼ一致する。
- ・ せん断ひずみゼロ付近まで除荷した後に載荷する場合の負荷曲線はスケルトン曲線にほぼ一致する。

以上を考慮して、負荷曲線は、図 4.4 に示すように、点 A を固定点として、スケルトン曲線上の線分 AB' を除荷曲線上の線分 AB に比例的に移動させた曲線によって表し

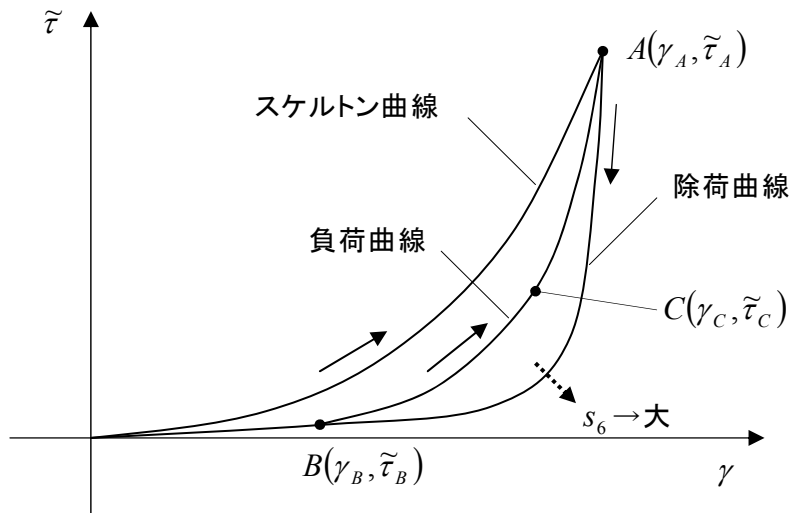


図 4.3 偏差応力を用いて表現した各曲線

た。図 4.4 より負荷曲線 $\tilde{\tau}_{rel}(\gamma)$ は次式で表される。

$$\tilde{\tau}_{rel}(\gamma_C) = \tilde{\tau}_B + (\tilde{\tau}_A - \tilde{\tau}_B) \times \frac{\tilde{\tau}_{skl}(\gamma_C) - \tilde{\tau}_{B'}}{\tilde{\tau}_A - \tilde{\tau}_{B'}} \quad \dots \dots \dots (4.17)$$

(4.17) 式を微分すると次式が得られる。

$$\frac{d\tilde{\tau}_{rel}(\gamma)}{d\gamma} = \frac{d\tilde{\tau}_{skl}(\gamma)}{d\gamma} \cdot \frac{\tilde{\tau}_A - \tilde{\tau}_B}{\tilde{\tau}_A - \tilde{\tau}_{B'}} \quad \dots \dots \dots (4.18)$$

4.3 数値解析

4.3.1 解析概要

提案された履歴則の精度を検証するために、積層ゴム単体の加力実験に対する数値解析を実施した。初めに、材料の異なる 2 種類の積層ゴムについて圧縮荷重ゼロで実施した実験を対象とした解析を行ない、パラメータの設定を含めた本履歴則の基本的な適用性について検討した。さらに、圧縮荷重を載荷した実験を対象として、本履歴則を修正マクロモデルのせん断ばね特性に適用した解析を行ない、終局挙動解析への適用性について検討した。

4.3.2 検証実験 4.1)、4.6)

試験体：実験に用いる試験体は直径 D が 200mm、ゴム総厚 h が 50mm の天然ゴム系積層ゴム縮小試験体である。異なるゴム材料の積層ゴムへの適用性を確認するため、せん断弾性係数 G としては、0.392MPa (G4 ゴム) 及び 0.578MPa (G6 ゴム) を対

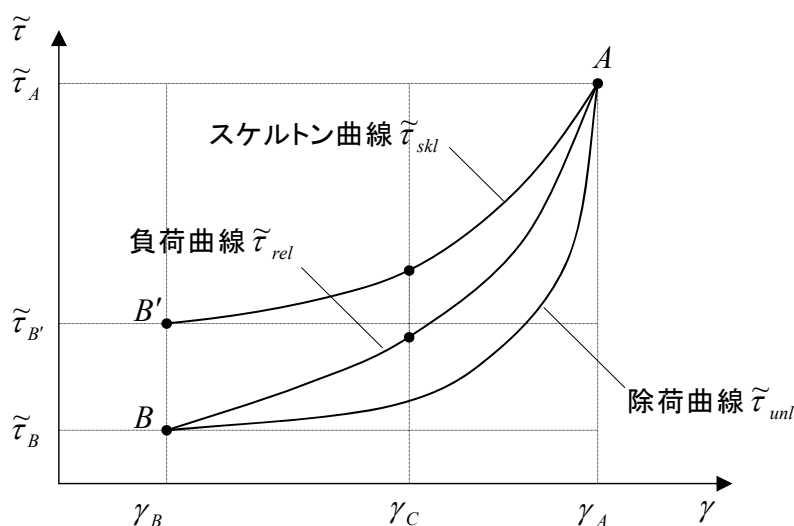


図 4.4 負荷曲線

象とした。試験体の諸元を表 4.1 に、ゴム材料の物性規格を表 4.2 にそれぞれ示す。
 ゴム 1 層厚 t_r は 2.0mm 及び 2.5mm で、1 次形状係数 S_1 はそれぞれ 25 及び 20、2 次形状係数 S_2 はともに 4 である。G4 ゴムは第 3 章の積層ゴム試験体と同一形状、G6 ゴムもゴム 1 層厚と中間鋼板厚が異なるほかはほぼ同一形状である。

表 4.1 試験体の諸元

ゴム種類		G4	G6
外径 D	(mm)	200	200
内径	(mm)	0.0	0.0
全高さ l	(mm)	78.4	80.4
ゴム 1 層厚 t_r	(mm)	2.0	2.5
ゴム層数		25	20
ゴム総厚 h	(mm)	50	50
中間鋼板厚	(mm)	1.2	1.6
1 次形状係数 S_1		25	20
2 次形状係数 S_2		4.0	4.0

表 4.2 ゴム材料の物性規格

ゴム種類		G4	G6
硬度 (JIS A)	(度)	37±5	40±5
20%伸長応力	(MPa)	—	0.33±0.1
100%伸長応力	(MPa)	0.8±0.2	—
引張強度	(MPa)	17 以上	19.6 以上
破断伸び	(%)	600 以上	500 以上
せん断弾性係数 G	(MPa)	0.392	0.578
縦弾性係数 E	(MPa)	2.2	2.2
体積弾性係数 E_∞	(MPa)	1200	1200
ゴム硬度による補正係数 κ		0.85	0.85

加力方法：試験ケースの一覧を表 4.3 に示す。試験体は各ケースにつき一体用い、面圧（鉛直荷重／積層ゴム断面積）を一定に保持した状態で水平方向に単調載荷又は繰り返し載荷を行った。単調載荷のケース①では、面圧を 0 としてせん断ひずみを 0 から 400%まで増加させた。繰り返し載荷のケース②～⑤では、面圧を 0、9.8、19.6MPa の 3 ケースとして、せん断ひずみを 0 から 500%まで 50%刻みで増加させた。ケース②では正側変形域のみの繰り返し、ケース③～⑤では正負の繰り返しとした。加力は、第 3 章と同じ加力装置（鉛直 1000kN×2、水平 500kN、図 3.10 参照）を用いて行い、いずれのケースについても静的に加力を行った。

表 4.3 実験ケース

ケース名	載荷方法	ゴム材料	面圧 (MPa)	せん断ひずみ(%)
ケース①	単調	G4	0	0～400
ケース②	繰り返し 漸増			0～500
ケース③		G6	0	-500～0～500
ケース④			9.8	
ケース⑤			19.6	

4.3.3 解析条件

解析に用いた積層ゴムの形状及びゴム材料の弾性定数等は、表 4.1、4.2 に示す通りである。各曲線のパラメータについては、面圧が 0 の実験から得られた $\tau-\gamma$ 曲線と合致するように定めることとした。以下に、G4 ゴムについて、面圧が 0 で単調載荷と繰り返し載荷を与えたケース①、ケース②を対象として、各パラメータの決定方法について述べる。

スケルトン曲線の形状（ s_1 、 s_2 ）：面圧が 0 で単調載荷を与えたケース①の $\tau-\gamma$ 曲線を参考にしてパラメータを決定した。 s_1 が小さくなるとハードニング開始位置が大きくなり、 s_2 が大きくなるとハードニングが強くなることを考慮し、ケース①の $\tau-\gamma$ 曲線とよく一致する s_1 及び s_2 としてまず 0.0005 と 4.8 を得た。なお、実験結果では γ が 200%程度まではソフトニングの傾向が認められる。よって、その領域での合致度を高めるために、せん断弾性係数の値としては設計値 0.392MPa (4.0kg/cm²) よりも小さい 0.343MPa (3.5kg/cm²) を採用した。一方、ケース②における大変形の繰り返しを再現するためには、最大せん断ひずみに応じて

せん断剛性が低下する性質を考慮する必要がある。よって、ハードニング性状をさらに強くすることとし、 s_2 として5.7を与えた。図4.5にスケルトン曲線と実験結果を比較して示す。

下限曲線の形状 (γ_l , s_4) : 下限曲線は初期剛性 G を持ち、 γ の増大に伴い $\tau = \tau_l$ に漸近する曲線である(図4.2参照)。 G の値としてはスケルトン曲線と同様に0.343MPaを与えた。 $\gamma_l = G/\tau_l$ より、 τ_l と γ_l のうちどちらか一方が決まれば他方は従属的に求められる。ここでは γ_l をパラメータとして考慮した。 γ_l と s_4 はケース②の τ - γ 曲線と比較することによって定めた。図4.6に τ - γ 曲線と下限曲線を示す。図に示すように、 γ が150~200%程度までは概ね τ - γ 曲線に一致し、その後は大変形域からの除荷後の勾配に沿うようにパラメータを選択した。この結果、 γ_l として4.0を、 s_4 として2.5をそれぞれ与えた。

除荷曲線の形状 (s_6) : 除荷曲線は、図4.3に示すように偏差応力座標系で定義される曲線である。 s_6 が1のときは除荷点と原点を結ぶ直線になるが、 s_6 が大きくなるにつれて、除荷勾配が大きくなり、図に示すような曲率を持つ曲線を描くようになる。 s_6 は図4.6に示した実験結果の除荷時の履歴性状と合致するように定めた。ここでは s_6 として15を与えた。

ハードニングシフト (s_3)、下限曲線の低減率 (s_5) : 繰り返しの影響を考慮するパラメータである。いずれも、図4.6の τ - γ 曲線とよく一致するように定め、 $s_3=0.5$ 、 $s_5=0.1$ を与えた。

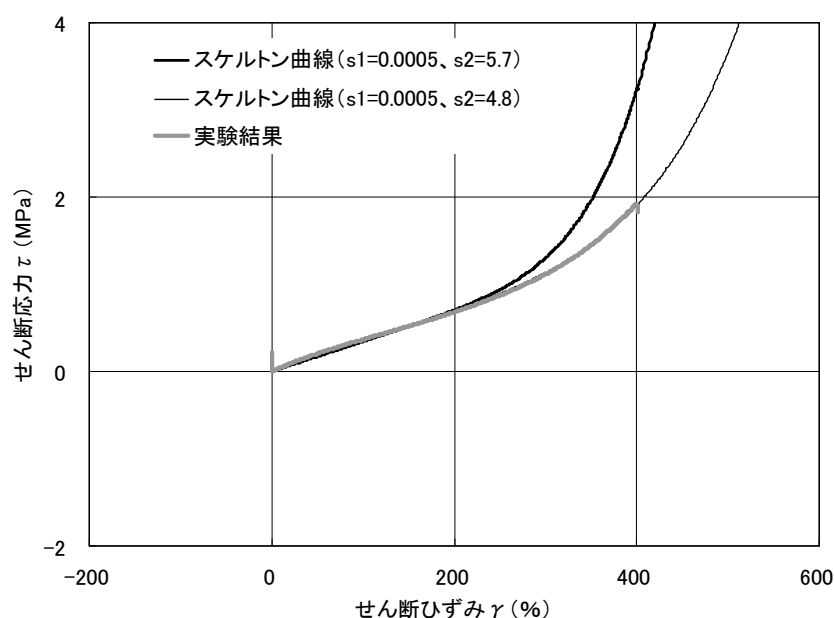


図 4.5 スケルトン曲線と実験結果

G6 ゴムについても、面圧が 0 のケース③を対象として、上記と同様の手順によってパラメータを決定した。表 4.4 にパラメータの一覧を示す。一方、面圧を与えたケース④及びケース⑤については、修正マクロモデルのせん断ばね特性に本履歴則を適用して解析を実施するが、パラメータはケース③と同じものを用いた。また、回転ばね特性を規定するパラメータ r は、既往の研究^{4.7)}を参考にして 1.2 を、軸ばね特性を規定するパラメータ a は第 3 章と同じく 1.6 を与えた。解析では、実験と同じように鉛直荷重と水平変形を既知として計算を進め、水平力と鉛直変形を求めた。

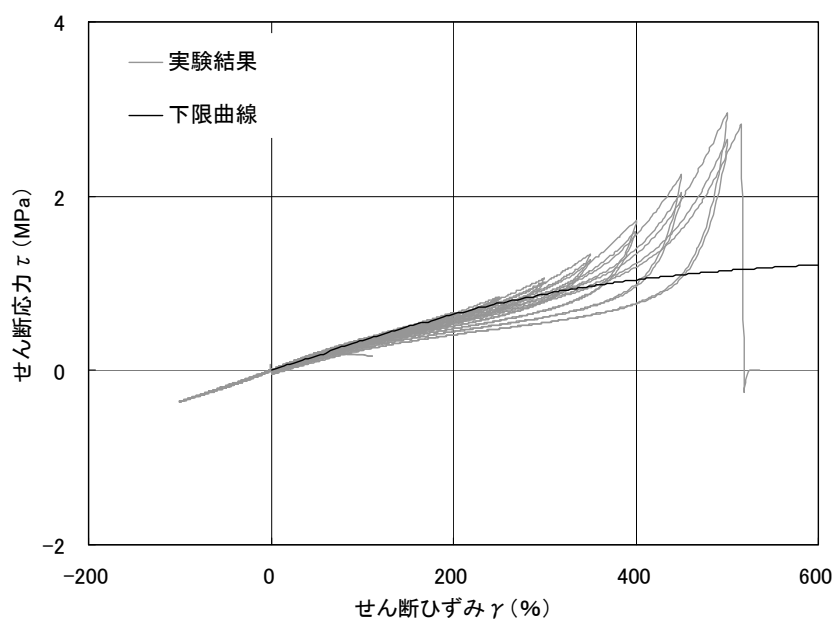


図 4.6 下限曲線と実験結果

表 4.4 履歴則のパラメータ一覧

曲線	パラメータ	G4	G6
スケルトン曲線	s_1	0.0005	0.0015
	s_2	5.7	6.0
	s_3	0.5	0.7
下限曲線	γ_l	4.0	3.5
	s_4	2.5	2.5
	s_5	0.1	0.2
除荷曲線	s_6	15.0	18.0

4.3.4 解析結果

図 4.7、4.8 に、面圧が 0 の場合の解析と実験の $\tau-\gamma$ 曲線を比較して示す。これより、いずれのケースについても、大変形域におけるハードニングと履歴ループの膨らみ及び大変形経験後の繰り返しによる剛性低下等がよく表現されている。また、今回実施した範囲においては、ゴム材料が異なる場合でも表 4.4 に示したパラメータの変動は小さく、パラメータに適切な値を設定することで実験と合致させることが可能である。ただし、積層ゴム特性のばらつきも考慮すれば、パラメータの設定については、今後、その他の積層ゴムを対象とした解析によるデータの蓄積が必要である。

図 4.9～4.12 に、面圧を与えた場合について、修正マクロモデルによる解析と実験の $\tau-\gamma$ 曲線及び鉛直ひずみ $\varepsilon-\gamma$ 曲線を比較して示す。なお、鉛直ひずみは積層ゴムが沈み込む方向を負として示している。これより、 $\tau-\gamma$ 曲線については、解析と実験の合致度は高く、大変形域においてせん断応力が頭打ちとなり負勾配が発生する様子並びに破壊直前にせん断応力が大きく低下する挙動が概ね表現されている。また、 $\varepsilon-\gamma$ 曲線についても、せん断ひずみの増大に伴い沈み込み変形が増大し、せん断ひずみ 300%程度以上で沈み込み変形がさらに大きく低下する様子が概ね表現されている。

以上より、本履歴則によって、鉛直荷重が 0 で繰り返し変形を受ける積層ゴムの大变形挙動を表現できること、また、本履歴則を修正マクロモデルに適用することによって圧縮荷重作用下で繰り返し変形を受ける積層ゴムの大变形挙動を概ね表現できることが確認された。

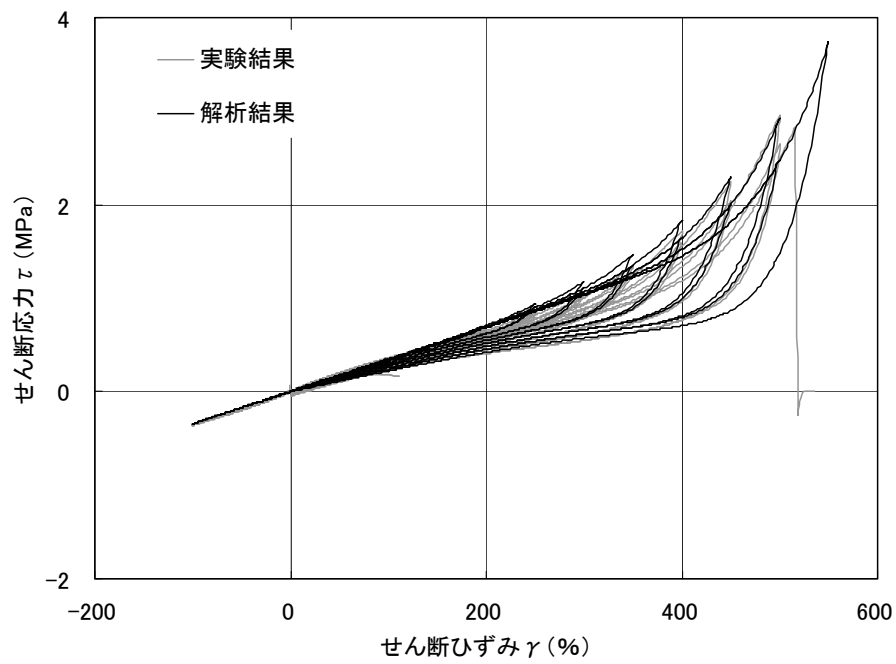


図 4.7 解析と実験の比較（ケース②、G4 ゴム、面圧 0）

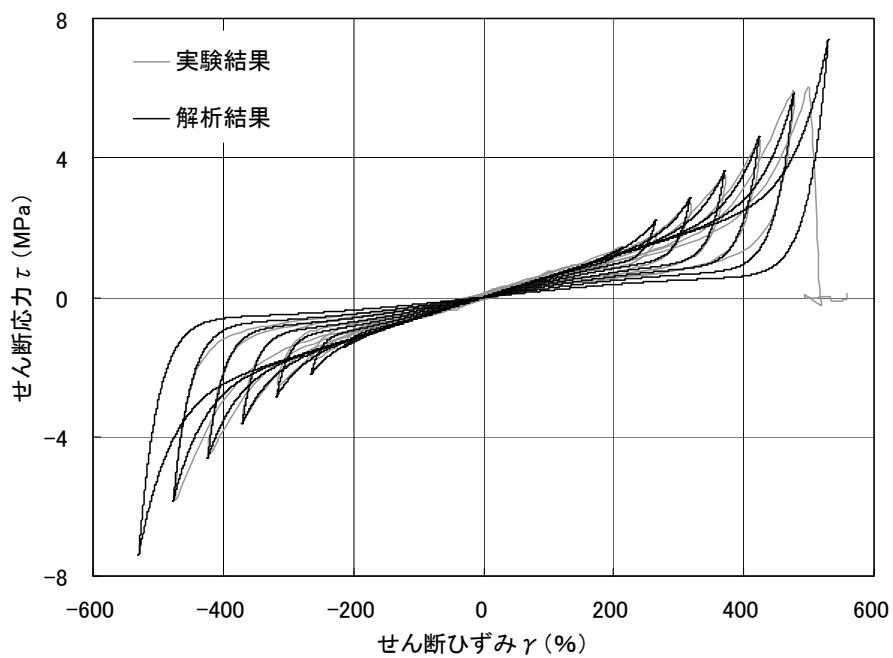


図 4.8 解析と実験の比較（ケース③、G6 ゴム、面圧 0）

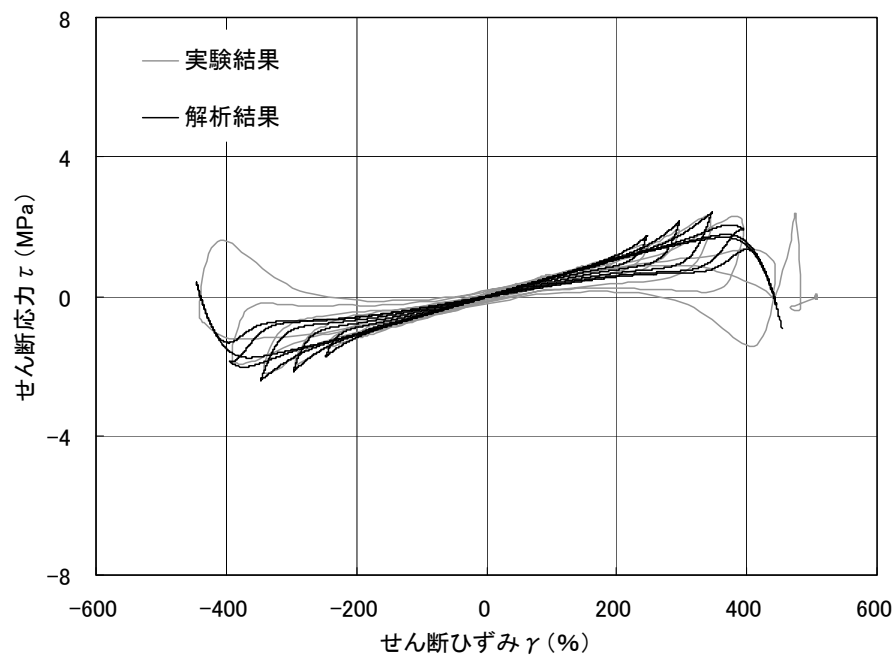


図 4.9 解析と実験の比較 (ケース④、G6 ゴム、面圧 9.8MPa)

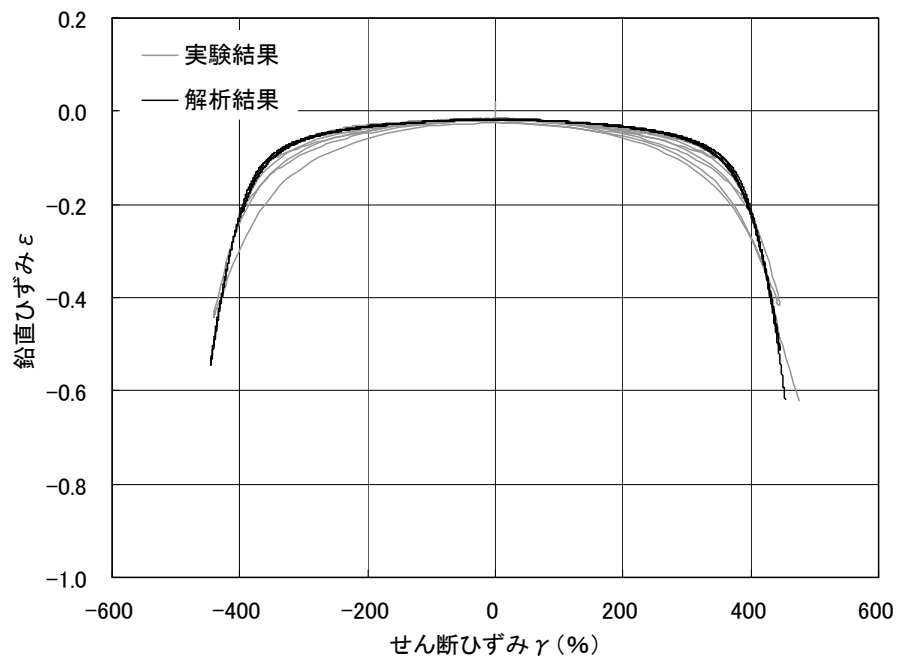


図 4.10 解析と実験の比較 (ケース④、G6 ゴム、面圧 9.8MPa)

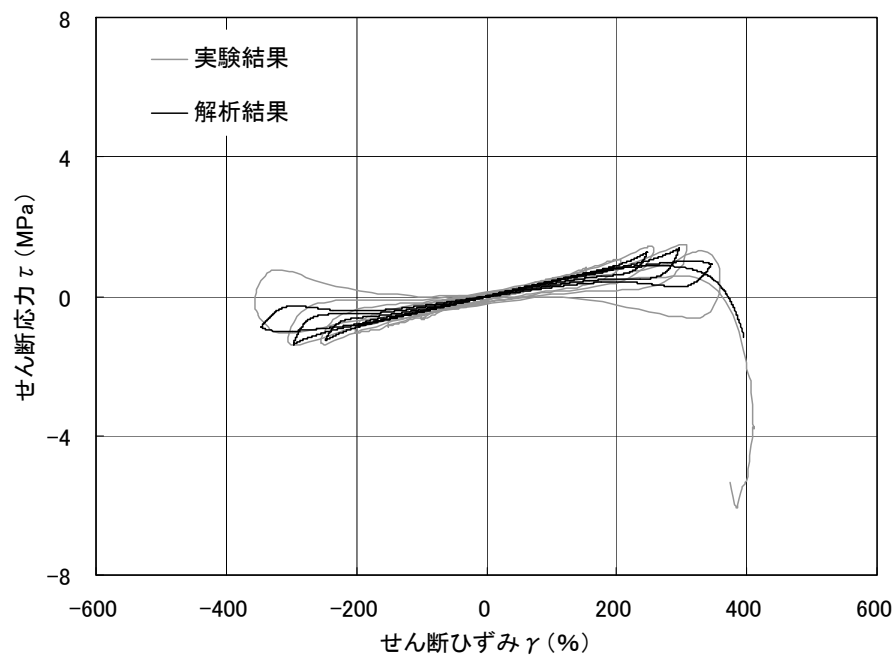


図 4.11 解析と実験の比較（ケース⑤、G6 ゴム、面圧 19.6MPa）

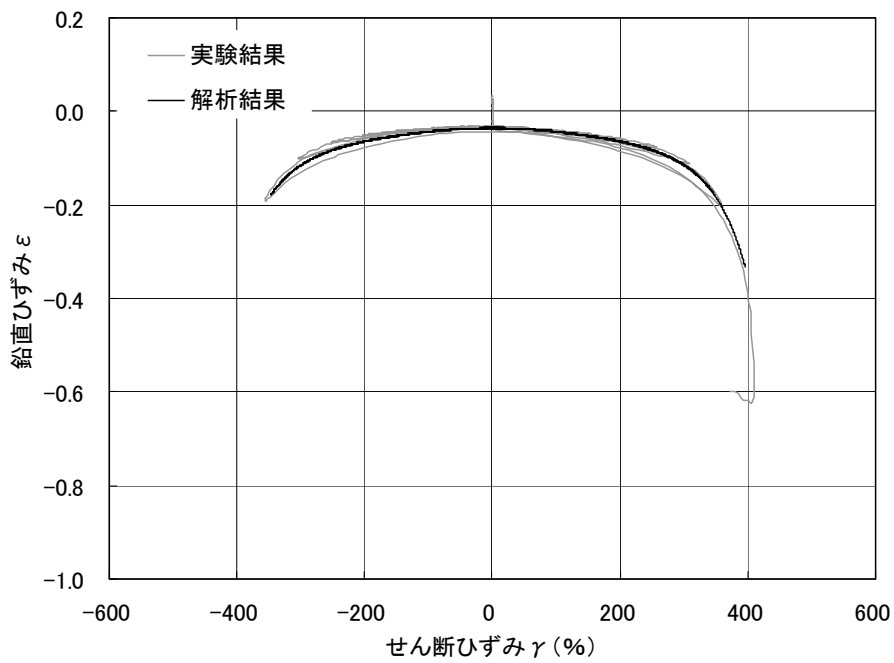


図 4.12 解析と実験の比較（ケース⑤、G6 ゴム、面圧 19.6MPa）

4.4 まとめ

修正マクロモデルによって繰り返し大変形を受ける積層ゴムの挙動を表すため、そのせん断ばね特性に適用する単純かつ精度の高い大変形せん断履歴則を考案した。本履歴則は、大変形域におけるハードニングと除荷時の履歴ループの膨らみ及び大変形経験後の繰り返しによる剛性低下が考慮できるものである。また、Rate モデル等の既往の曲線モデルと比較すると、単純な曲線式で構成されているため、視覚的にも理解しやすく、曲線式に含まれるいくつかのパラメータについても設定が容易なものになっている。本履歴則の精度と汎用性を検討するために、2 種類のゴム材料の天然ゴム系積層ゴムの大変形加力実験結果を対象とした数値解析を実施した。実験では、試験体として直径 200mm、せん断弾性係数 0.392MPa 及び 0.578MPa の天然ゴム系積層ゴム縮小試験体を用いて、圧縮荷重一定下で水平方向に繰り返し漸増载荷を行った。解析と実験の比較より以下のことが確認された。

- (1) 圧縮荷重が 0 の場合：本履歴則を直接用いた履歴曲線形状は、実験で得られた曲線の特徴を良く表現できる。また、ゴム材料が異なってもパラメータに適切な値を設定することで解析と実験を合致させることができる。
- (2) 圧縮荷重を与えた場合：本履歴則を修正マクロモデルのせん断ばね特性に適用した。これより、積層ゴムの大変形域における水平復元力の低下や鉛直沈み込み変形の繰り返し性状をよく表現し得る。

以上より、本履歴則は精度が高く、扱いやすさの点からも十分に実用的であると考えられる。次章では、免震建物の終局挙動を対象とした時刻歴応答解析法に、本履歴則を適用する。

第 4 章参考文献

- 4.1) 八坂厚彦、水越熏、飯塚真巨、高林勝人：形状係数をパラメータとした積層ゴムの限界特性実験（その 1 復元力特性）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、pp.599-600、1991.9.
- 4.2) 田中栄一、石田勝彦、水越薫、塩尻弘雄、竹中康雄、今野孝昭：免震システムの終局挙動を対象とした振動解析評価法の研究 その 1 折れ線型復元力モデルによる検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、1991.9.
- 4.3) 藤田隆史、鈴木重信、藤田聡：建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究（第 1 報、履歴復元力の基本特性と解析モデル）、日本機械学会論文集（C 編）56 巻 523 号、1990.3.
- 4.4) 酒向裕司、竹中康雄、吉川和秀：積層ゴムの水平および上下の復元力モデル、日本建築学会関東支部研究報告集、1991.
- 4.5) 菊地優、猿田正明、田村和夫：建物免震用積層ゴムの復元力特性に関する研究、構造工学論文集 Vol.40B、pp.177-188、1994.3.
- 4.6) 高岡栄治、飯塚真巨：引張軸力下における積層ゴムの力学特性に関する研究、鹿島技術研究所年報 48 号、pp.169-174、2000.9.
- 4.7) 日本建築学会編：免震構造設計指針第 2 版、pp.545-563、1993.

第5章 積層ゴムで支持した免震建物の終局挙動解析法

5.1 はじめに

建物の設計では、設計レベルを超えるような地震動に対しても致命的な損傷が生じない設計を行うことが重要である。これを達成するためには、建物の限界状態に対する安全余裕度を適切に評価する必要がある、その意味でも建物の終局挙動の把握は重要な課題となる。免震建物の終局挙動を予測する手法としては、一般に時刻歴応答解析が有効である。積層ゴムが引張り荷重を受ける場合については、積層ゴムの力学モデルとして、大変形域でのハードニングを表す水平ばね及び引張り降伏を考慮した鉛直ばねを採用することにより、終局挙動を概ね追跡することができる。例えば、Ishida 等^{5.1)}は塔状比の小さい原子炉建屋について、二村等^{5.2)}は塔状比の大きい免震建物についてそれぞれ模型を対象とした振動台実験の数値解析を実施し、この種の解析手法の妥当性を確認している。一方、圧縮荷重を受ける積層ゴムは、水平変形の増大に伴い水平復元力や鉛直剛性が低下する性質を有し、さらに過大な水平変形下では最終的に鉛直荷重支持能力を失い、座屈破壊へと至ることが知られている^{5.3)・5.4)}。従って、積層ゴムが過大な水平変形下で座屈破壊するような終局挙動を解析する場合には、積層ゴムの大変形域における複雑な復元力特性を精度よく表現する力学モデルが必要となる。しかし、これまでに積層ゴムの座屈破壊で終局となる場合について地震応答解析を試みた例は見られない。山本等^{5.5)}は、Koh-Kelly のモデル^{5.6)}に非線形軸ばねを付け加えたモデルを用いて、圧縮荷重下での積層ゴムの水平復元力の低下と引張りによる降伏が考慮できる地震応答解析法を提案している。しかし、積層ゴムの座屈破壊で終局となるようなケースは扱っておらず、また振動台実験の数値解析等による解析法の妥当性を検証していない。一方、第2章で示した通り、免震建物の終局挙動を明らかにするために、縮小模型を用いた振動台実験を行い、積層ゴムの引張り破断あるいは座屈破壊によって試験体が終局に至るまでの詳細な挙動が解明されている。特に、座屈破壊によって終局に至ったケースはこの実験以外には見当たらない。

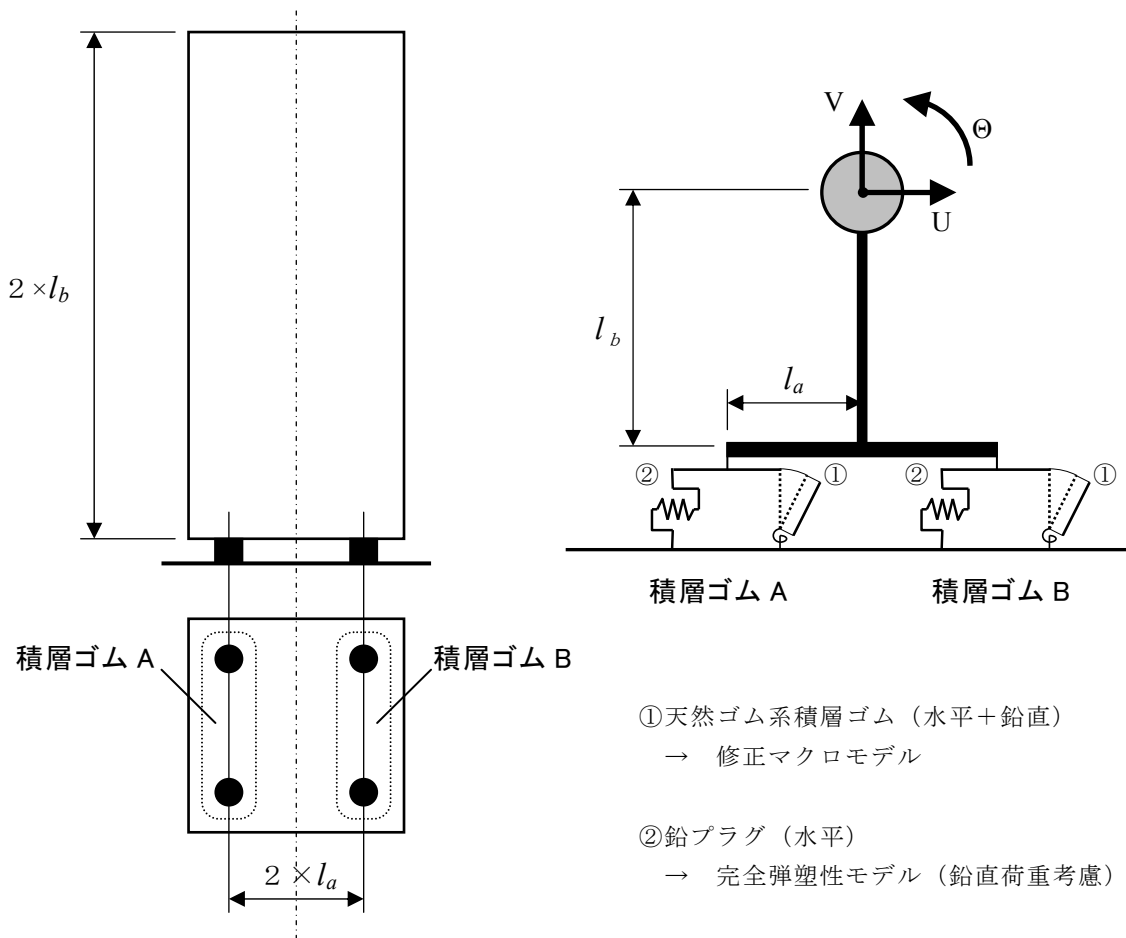
そこで本章では、積層ゴムの座屈破壊による免震建物の終局挙動を予測できる時刻歴応答解析法を提示し、上記の振動台実験のうち、過大な水平変形下で積層ゴムに座屈が生じた実験ケースを対象として、数値解析を実施した。ここで用いた解析法は、積層ゴムの特性を第3章で提示した修正マクロモデルによって表し、そのせん断ばね特性として第4章で提示した大変形せん断履歴則を採用している点が特徴である。また、一般に採用されている終局地震応答解析法（積層ゴムの引張りは考慮するが、座

屈は考慮しない解析法)との比較により、本解析法の妥当性及び有効性を検討した。なお、本章では、積層ゴムとして鉛プラグ入り積層ゴム (LRB) を用いた実験ケースを解析対象とする。これは、LRB の水平復元力特性が、天然ゴム系積層ゴムと鉛プラグの特性を組み合わせた形で表現されるため^{5.7)}、前者の特性として修正マクロモデルをそのまま適用できることによる。一方、高減衰積層ゴムについては、減衰性の高いゴム材料を用いていることから、ばね要素のみを抽出することは困難であり、LRB と同じ方法による修正マクロモデルの適用は難しいと判断した。よって、高減衰積層ゴムを用いた実験ケースは解析の対象外とした。

5.2 解析モデル

解析対象とした構造物と解析モデルを図 5.1 に示す。解析対象は、第 2 章の振動台実験の試験体を想定したもので、剛な上部構造を 4 個の鉛プラグ入り積層ゴム (LRB) で支持した免震建物である。地震波の入力方向は水平 1 方向である。解析モデルは上部構造の質量を重心位置に集約した 1 質点モデルで、質点の自由度は重心における水平 (U)、鉛直 (V) 及び回転 (Θ) の 3 自由度である。水平 1 方向入力を考慮して、図 1 の点線内の積層ゴムをまとめて「積層ゴム A」、「積層ゴム B」とする。LRB の特性については、天然ゴム系積層ゴムの特性と鉛プラグの特性に分けて評価し、両者を加え合わせることにした^{5.7)}。天然ゴム系積層ゴムの水平方向及び鉛直方向の復元力特性は修正マクロモデルによって、鉛プラグの水平復元力特性は鉛直荷重を考慮した完全弾塑性モデルによって表した。両積層ゴムと質点間は剛部材とした。

なお、第 2 章で述べた実験結果より、大入力時には引張り変形及び沈み込み変形に伴い免震層に回転角が生じ、積層ゴムの上端部に回転角が生じることが確認された。積層ゴムの端部回転が水平特性に及ぼす影響に関する研究については、積層ゴムの端部に回転角を与えた加力実験が実施されている^{5.8)}。これによると、直径 200mm で S_2 が 4 の縮小試験体を対象とし、面圧 12MPa、せん断ひずみ 200%の条件下で行った実験では、端部回転角 0.01rad における水平剛性は回転角 0 のそれと比較して、88%程度に低下した。一方、第 2 章の実験結果より、解析対象である積層ゴムに座屈が生じたケース①では、免震層回転角は最大でも 0.005rad 程度であり、水平剛性の低下は上述の結果よりも小さくなることが予想される。よって、ケース①における積層ゴムの端部回転の影響は無視できると判断される。



解析対象構造物

解析モデル

図 5.1 解析対象構造物と解析モデル

5.3 運動方程式

図 5.1 より、 n ステップの重心に関する運動方程式は次式によって表される。

$$[M]\{\ddot{X}_n\} + [C]\{\dot{X}_n\} + \{F_n\} = -[M]\{f\}\ddot{X}_{0n} \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

ここで、

$$\{X_n\} = \begin{Bmatrix} U_n \\ V_n \\ \Theta_n \end{Bmatrix}, \quad \{f\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad [M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} : \text{質量マトリクス}$$

$$\{F_n\} = \{ {}_U F_n \quad {}_V F_n \quad {}_\Theta F_n \}^T : \text{重心に生じる各成分の力}$$

$$[C] = \frac{Th_s}{\pi} \cdot [K] : \text{減衰マトリクス}$$

(h_s : 減衰定数、 T : 建物固有周期、 $[K]$: 剛性マトリクス)

m 、 I : 上部構造の質量、回転慣性、 \ddot{X}_0 : 地動加速度

運動方程式を解く際には、数値積分法として中央差分法（衝撃加速度法）^{5.9)}を用いた。中央差分法は Newmark の β 法で $\beta=0$ としたもので、復元力をフィードバックして次ステップの変形を陽に求めることができる解法である。陽的な数値積分法を選択した理由は、修正マクロモデルから求められる積層ゴムの水平及び鉛直の荷重は複雑に変動するため、剛性をフィードバックする一般法の採用が難しいと判断したためである。積分時間刻みを Δt とすると、 n ステップの変形、速度及び加速度は次式によって与えられる。

$$\{X_n\} = \{X_{n-1}\} + \{\dot{X}_{n-1}\} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \{\ddot{X}_{n-1}\} \cdot \Delta t^2 \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

$$\{\dot{X}_n\} = \{\dot{X}_{n-1}\} + \frac{1}{2} (\{\ddot{X}_{n-1}\} + \{\ddot{X}_n\}) \cdot \Delta t \quad \dots \dots \dots (5.3)$$

$$\{\ddot{X}_n\} = [\overline{M}]^{-1} \cdot \{\overline{F}\} \quad \dots \dots \dots (5.4)$$

ここで、 $[\overline{M}] = [M] + \frac{\Delta t}{2} [C]$

$$\{\overline{F}\} = -[M] \cdot \{f\} \ddot{X}_{0n} - [C] \cdot \left(\{\dot{X}_{n-1}\} + \frac{\Delta t}{2} \{\ddot{X}_{n-1}\} \right) - \{F_n\}$$

5.4 解析手順

解析フローを図 5.2 に示す。以下、図に従って運動方程式の解法と修正マクロモデルの適用方法を示す。

$n-1$ ステップにおいて以下の諸量を既知とする。

- ・ 重心における変位 $\{X_{n-1}\}$ 、速度 $\{\dot{X}_{n-1}\}$ 、加速度 $\{\ddot{X}_{n-1}\}$
- ・ 各積層ゴムの鉛直荷重 ${}_iP_{n-1}$ 、水平力 ${}_iQ_{n-1}$ 、鉛直変形 ${}_i\delta v_{n-1}$ 、水平変形 ${}_i\delta h_{n-1}$ 、回転ばねの回転角 ${}_i\theta_{n-1}$ 、せん断ばねの変形 ${}_i\delta_{Sn-1}$ 、

添え字の i は積層ゴムの番号で、積層ゴム A を $i=1$ 、積層ゴム B を $i=2$ とする。積層ゴムの変形より、 $n-1$ ステップにおける微係数 $\partial_i M / \partial_i \theta_{n-1}$ 、 $\partial_i M / \partial_i P_{n-1}$ 、 $d_i Q_s / d_i \delta_{Sn-1}$ 、 $\partial_i P_a / \partial_i \delta v_{n-1}$ 、 $\partial_i P_a / \partial_i \theta_{n-1}$ が求められる。(5.2)式に、 $\{X_{n-1}\}$ 、 $\{\dot{X}_{n-1}\}$ 、 $\{\ddot{X}_{n-1}\}$ を代入すると n ステップの重心変位 $\{X_n\}$ が求められる。重心と積層ゴムの幾何学的な関係より、 n ステップにおける各積層ゴムの水平変形 ${}_i\delta h_n$ 及び鉛直変形 ${}_i\delta v_n$ を次式より求める。

$${}_1\delta h_n = U_n + l_b \cdot \Theta_n \quad \dots \dots \dots (5.5)$$

$${}_1\delta v_n = V_n - l_a \cdot \Theta_n \quad \dots \dots \dots (5.6)$$

$${}_2\delta h_n = U_n + l_b \cdot \Theta_n \quad \dots \dots \dots (5.7)$$

$${}_2\delta v_n = V_n + l_a \cdot \Theta_n \quad \dots \dots \dots (5.8)$$

第 3 章で示した修正マクロモデルによる積層ゴムの荷重増分と変形増分の関係式(3.26)式に、 $n-1$ ステップにおける積層ゴムの諸量と、水平変形及び鉛直変形の増分 ${}_i\Delta\delta h$ 及び ${}_i\Delta\delta v$ を代入すると、水平力及び鉛直荷重の増分 ${}_i\Delta Q$ 及び ${}_i\Delta P$ が求められる。続いて、同じく修正マクロモデルの関係式(3.25)式に ${}_i\Delta\delta h$ 、 ${}_i\Delta\delta v$ 及び ${}_i\Delta Q$ 、 ${}_i\Delta P$ を代入すると、回転ばねの回転角及びせん断ばねの変形の増分 ${}_i\Delta\theta$ 及び ${}_i\Delta\delta_s$ が得られる。よって、 n ステップの水平力 ${}_iQ_n$ 、鉛直荷重 ${}_iP_n$ 、回転ばねの回転角 ${}_i\theta_n$ 、せん断ばねの変形 ${}_i\delta_{Sn}$ が求められる。一方、重心と積層ゴムの力の釣り合いより、 $\{F_n\}$ の各成分は次式で与えられる。

$${}_UF_n = {}_1Q_n + {}_2Q_n \quad \dots \dots \dots (5.9)$$

$${}_VF_n = {}_1P_n + {}_2P_n \quad \dots \dots \dots (5.10)$$

$${}_OF_n = ({}_1Q_n + {}_2Q_n) \cdot l_b - ({}_1P_n - {}_2P_n) \cdot l_a \quad \dots \dots \dots (5.11)$$

(5.4)式及び(5.3)式より、 n ステップの加速度 $\{\ddot{X}_n\}$ 及び速度 $\{\dot{X}_n\}$ を順次求める。以上の計算の結果、 n ステップにおける、重心の変位、速度、加速度及び積層ゴムに関する諸量すべてが求められる。

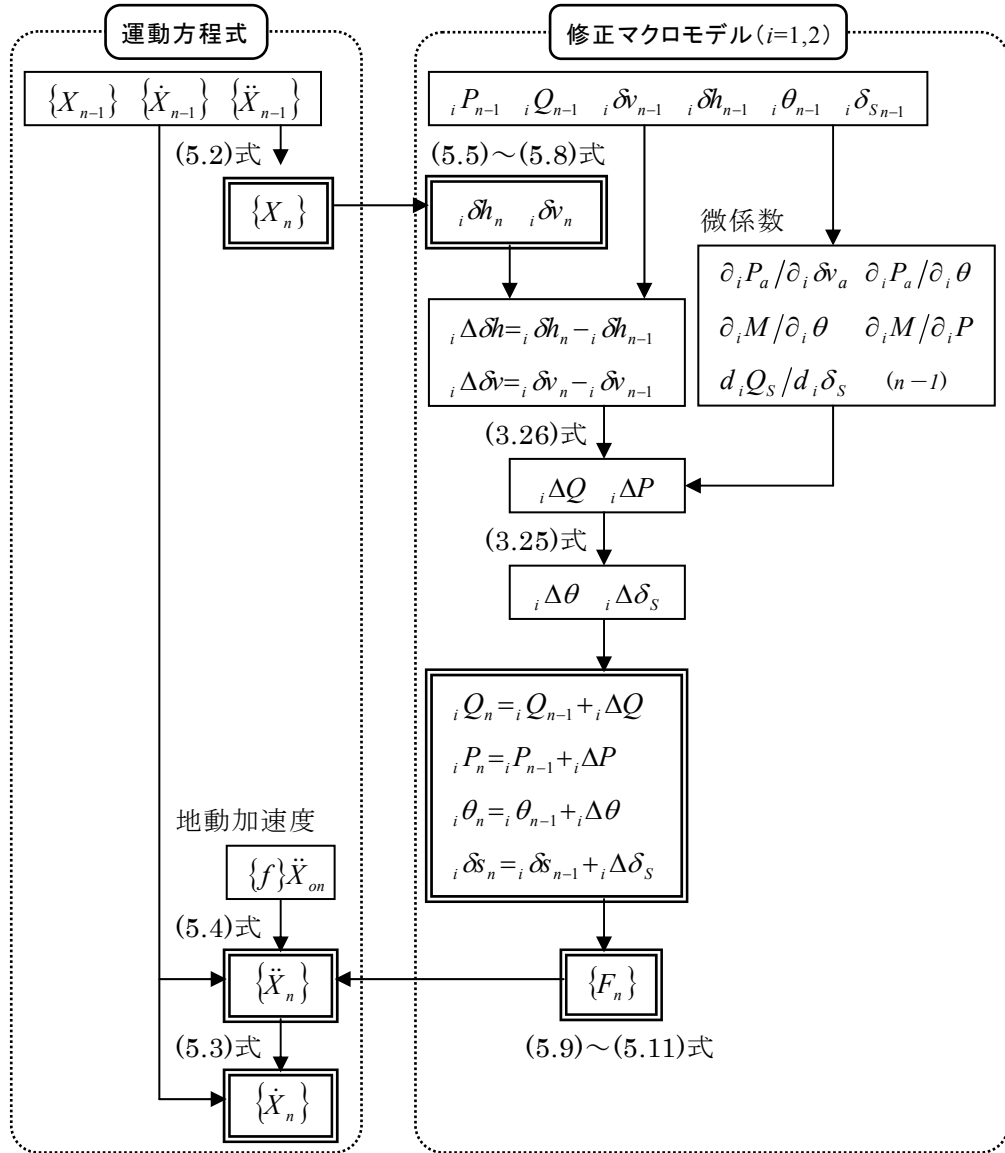


図 5.2 解析フロー

5.5 ばね特性

5.5.1 ばね特性の定義

天然ゴム系積層ゴムの水平及び鉛直方向の復元力特性は修正マクロモデルによって、鉛プラグの水平復元力特性は鉛直荷重を考慮した完全弾塑性モデルによって表した。修正マクロモデルに用いる回転ばね、軸ばねの復元力特性としては第3章で定義した非線形ばね特性を、せん断ばねの復元力特性としては第4章で提案した大変形せん断履歴則をそれぞれ適用した。

5.5.2 鉛プラグの復元力特性

鉛プラグ入り積層ゴムの降伏応力 τ_{pb} は、面圧 σ （鉛直荷重／積層ゴム断面積）の増加に伴い大きくなる特性を有する^{5.10)}。そこで、鉛プラグの復元力特性のモデル化に面圧の影響を採り入れた。図5.3にモデルの概要を示す。基本的なモデルは完全弾塑性モデルで、降伏せん断ひずみを γ_{pb} で一定とし、 σ に応じて τ_{pb} を変化させた。 τ_{pb} は面圧0の時に鉛の降伏せん断応力 8.33MPa とし、面圧の変動範囲 0～15 MPa に対して 0～+45%で変動させた。

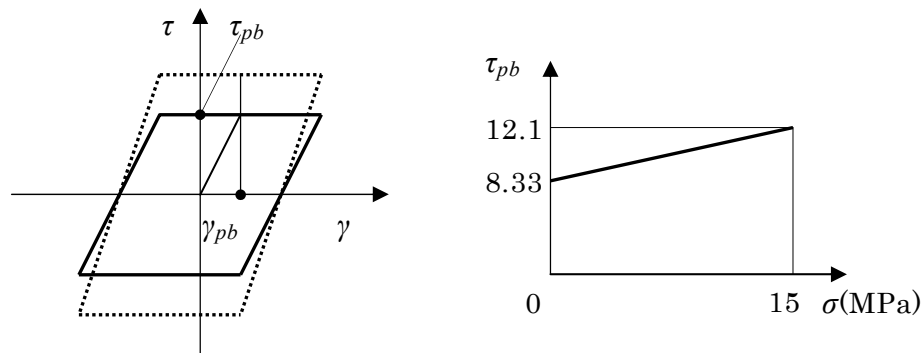


図 5.3 鉛プラグのモデル化

5.6 数値解析

5.6.1 解析条件

提案した解析手法を用いて振動台実験の数値解析を行った。解析対象は、積層ゴムに座屈破壊が生じたケース①で、加振レベルは終局直前の $2.5 \times L2$ （最大加速度：8.90m/s²）及び終局レベルの $3.0 \times L2$ （最大加速度：10.68m/s²）とした。入力波は実験時に振動台上で計測された加速度波形を用いた。積層ゴムの弾性係数については表5.1に示す設計値を用いた。回転ばね、せん断ばね及び軸ばね特性に用いるパラメータを表5.2に示す。パラメータは第4章における積層ゴム単体の解析結果を参考に、

表 5.1 積層ゴムの形状・諸元及び材料の設計用弾性係数

直径 D	mm	90
内径（鉛径）	mm	18
ゴム 1 層厚さ t_r	mm	1.0
ゴム層総厚さ h	mm	22
全高さ l	mm	43
1 次形状係数 S_1	—	22.5
2 次形状係数 S_2	—	4.1
ゴムのせん断弾性係数 G	MPa	0.392
ゴムの縦弾性係数 E	MPa	2.2
ゴムの体積弾性係数 E_∞	MPa	1200
ゴム硬度による補正係数 κ	—	0.85
ゴムの引張り降伏応力 σ_y	MPa	-1.47
鉛の降伏せん断応力 τ_{pb}	MPa	8.33

表 5.2 解析パラメータ一覧

回転ばね		r	1.5
せん断ばね	スケルトン 曲線	s_1	0.012
		s_2	3.0
		s_3	1.0
	下限曲線	s_4	2.5
		s_5	0.3
		γl	4.0
	除荷曲線	s_6	15
軸ばね		s_7	1.4

2.5×L2 の実験結果をシミュレートする値を選定した。鉛プラグの降伏せん断ひずみ γ_{pb} は実験結果の積層ゴム初期剛性に合致する値として 0.04 を採用した。また、鉛直方向のみ免震周期 1.33s に対して 0.6%の初期剛性比例型の減衰を与えた。

5.6.2 解析結果

(1)2.5×L2

図 5.4～5.6 に、各積層ゴムについて、水平力(Q)－水平変形(δh)曲線、鉛直変形(δv)－ δh 曲線、鉛直荷重(P)－ δv 曲線を、解析結果と実験結果について示す。なお、鉛直変形については、実験結果と合わせるために、加振前の静止した状態（静止時）を原点として表示している。これより以下のことが指摘できる。

Q － δh 曲線：水平変形が負側の曲線に着目すると、実験において見られる、積層ゴム A の水平力が頭打ちとなり負勾配発生後に大きく低下する挙動、積層ゴム B の水平力にハードニングが生じその後の除荷時にループが膨らむ挙動が、解析によって概ね表現されている。細かく見ると最大変形時（-90mm 付近）における積層ゴム A の水平力の低下及び積層ゴム B のハードニングは、実験と比較してやや小さい。これは、積層ゴム A では、実験の水平変形が直径相当の変形を超えているため水平力が大幅に低下していること、積層ゴム B では、繰り返しの伴う剛性低下が小さく、積層ゴム単体の特性から設定した履歴則に合致しないことに起因する。

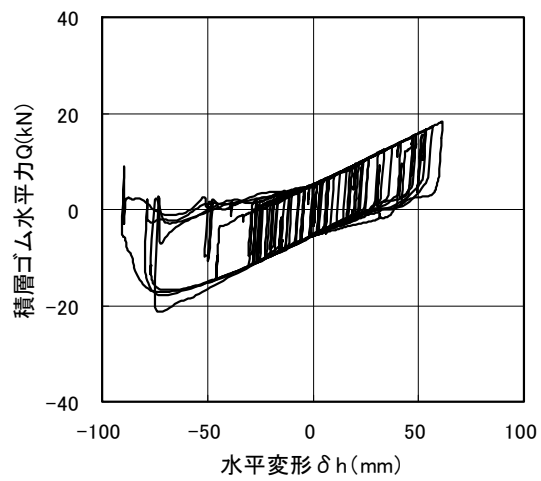
δv － δh 曲線：実験より、正負ともに水平変形の増大に伴い沈み込み変形が大きくなる。負側最大変形時の変形量は-6mm を超えており、積層ゴムが大きく沈み込んでいる。一方、これらの沈み込みの現象が、解析によってほぼ表現されている。

P － δv 曲線：解析と実験の初期剛性はほぼ一致している。また、解析によって、鉛直荷重がほぼ頭打ちとなり鉛直変形が増大する現象が概ね表現されている。

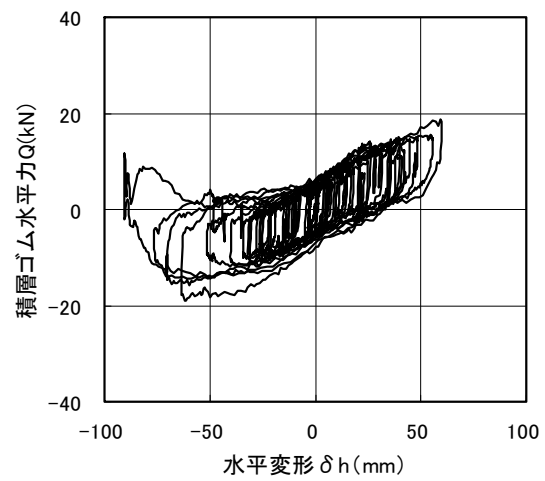
図 5.7 に、免震層水平変形、重心水平変位、各積層ゴムの鉛直変形について、解析と実験の時刻歴波形を比較して示す。これより、いずれについても解析と実験は非常によく一致しており、解析によって水平方向と鉛直方向の変形が精度よく再現されている。図 5.8 に、重錘の重心、上端、下端の水平加速度について、解析と実験の時刻歴波形を比較して示す。これより、重心の水平加速度については解析と実験はよく一致している。また、上端と下端の水平加速度についても、解析の振幅が実験よりも若干大きくなる傾向が見られるが、振動の周期については解析と実験はほぼ一致している。

(2) $3.0 \times L2$

図 5.9～5.11 に、各積層ゴムについて、 $Q-\delta h$ 曲線、 $\delta v-\delta h$ 曲線、 $P-\delta v$ 曲線を解析結果と実験結果について示す。また、図 5.12、5.13 に解析と実験の時刻歴波形を比較して示す。解析時間は免震層水平変形が積層ゴムの直径相当の変形を超え、水平力が大きく低下した 5 s までとしている。これより、終局レベルについても $2.5 \times L2$ と同様に積層ゴムの挙動が表現されている。実験では時刻 5 s 付近で水平変形が直径相当の変形 90mm を超え積層ゴムが破壊に至ったが、解析でも同時刻付近で水平変形が 90mm を超えており、終局直前までの挙動を追跡できることが分かる。

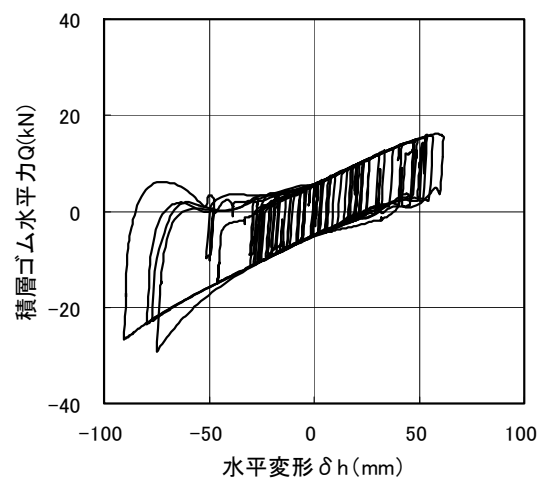


解析

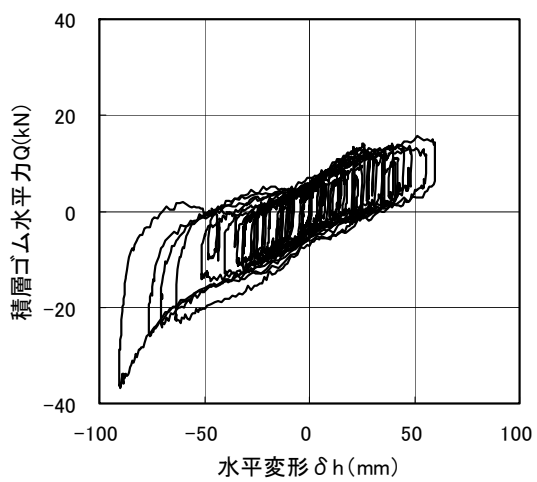


実験

積層ゴム A



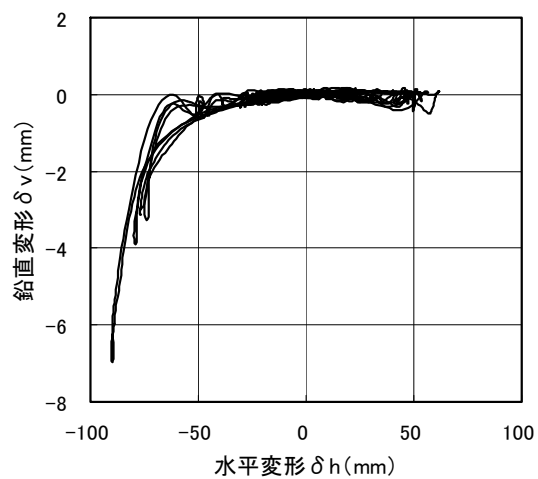
解析



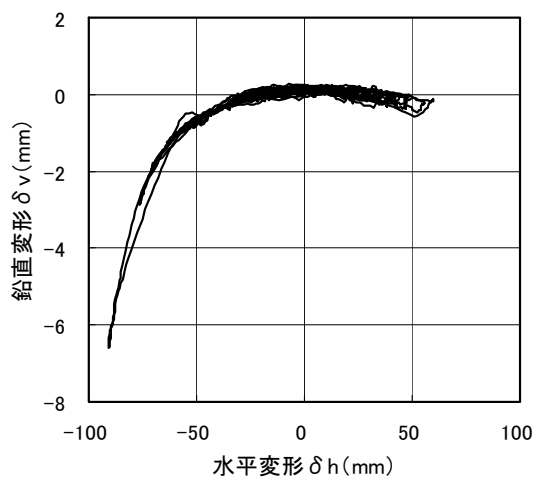
実験

積層ゴム B

図 5.4 解析結果と実験結果の比較：ケース① $2.5 \times L2$ 、 $Q-\delta h$ 曲線

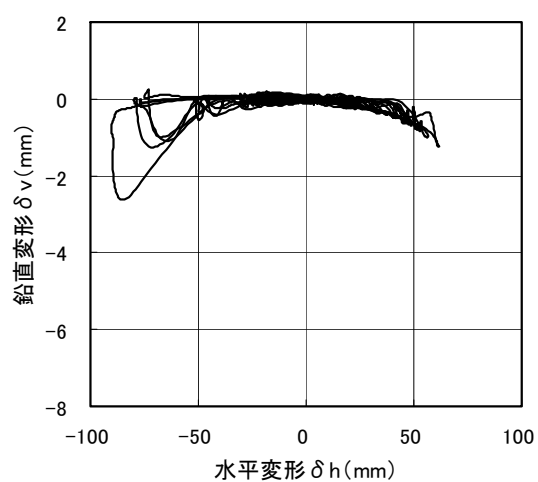


解析

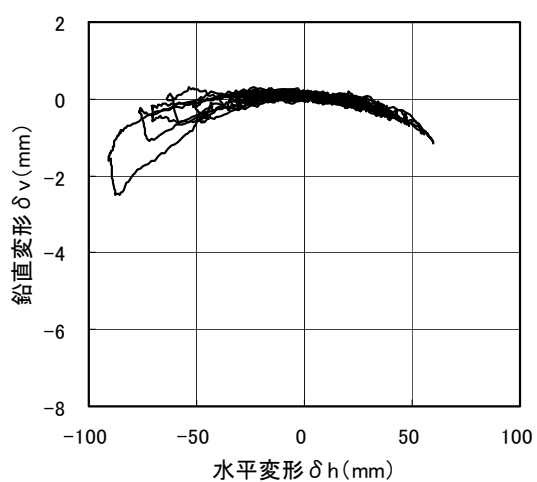


実験

積層ゴム A



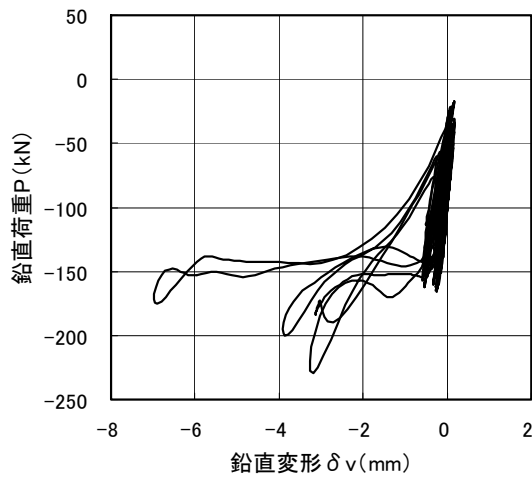
解析



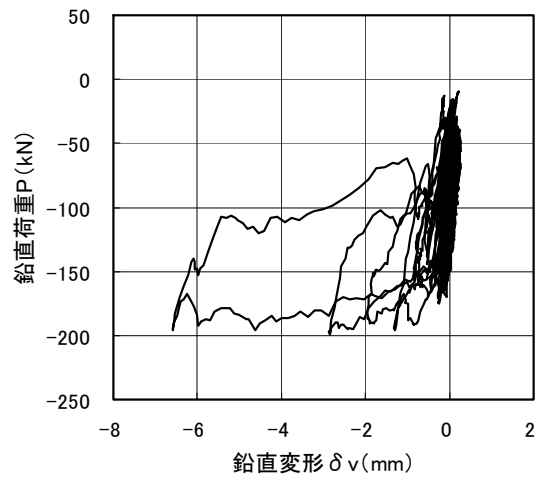
実験

積層ゴム B

図 5.5 解析結果と実験結果の比較：ケース① $2.5 \times L2$ 、 $\delta v - \delta h$ 曲線

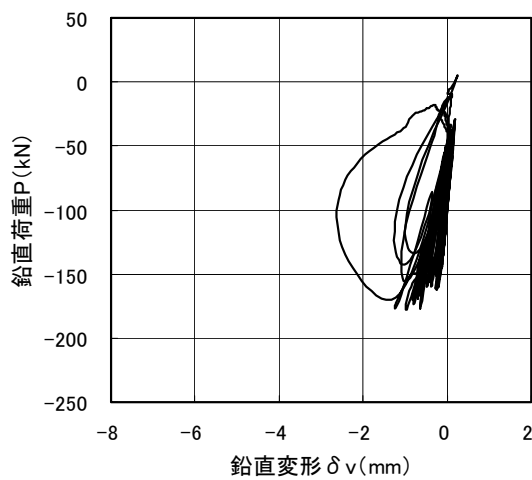


解析

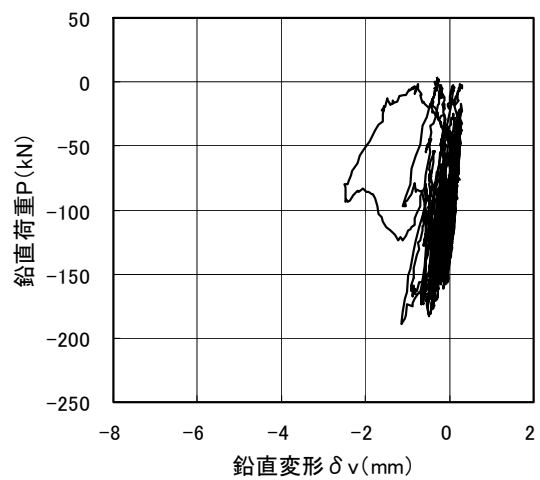


実験

積層ゴム A



解析



実験

積層ゴム B

図 5.6 解析結果と実験結果の比較：ケース①2.5×L2、 $P-\delta v$ 曲線

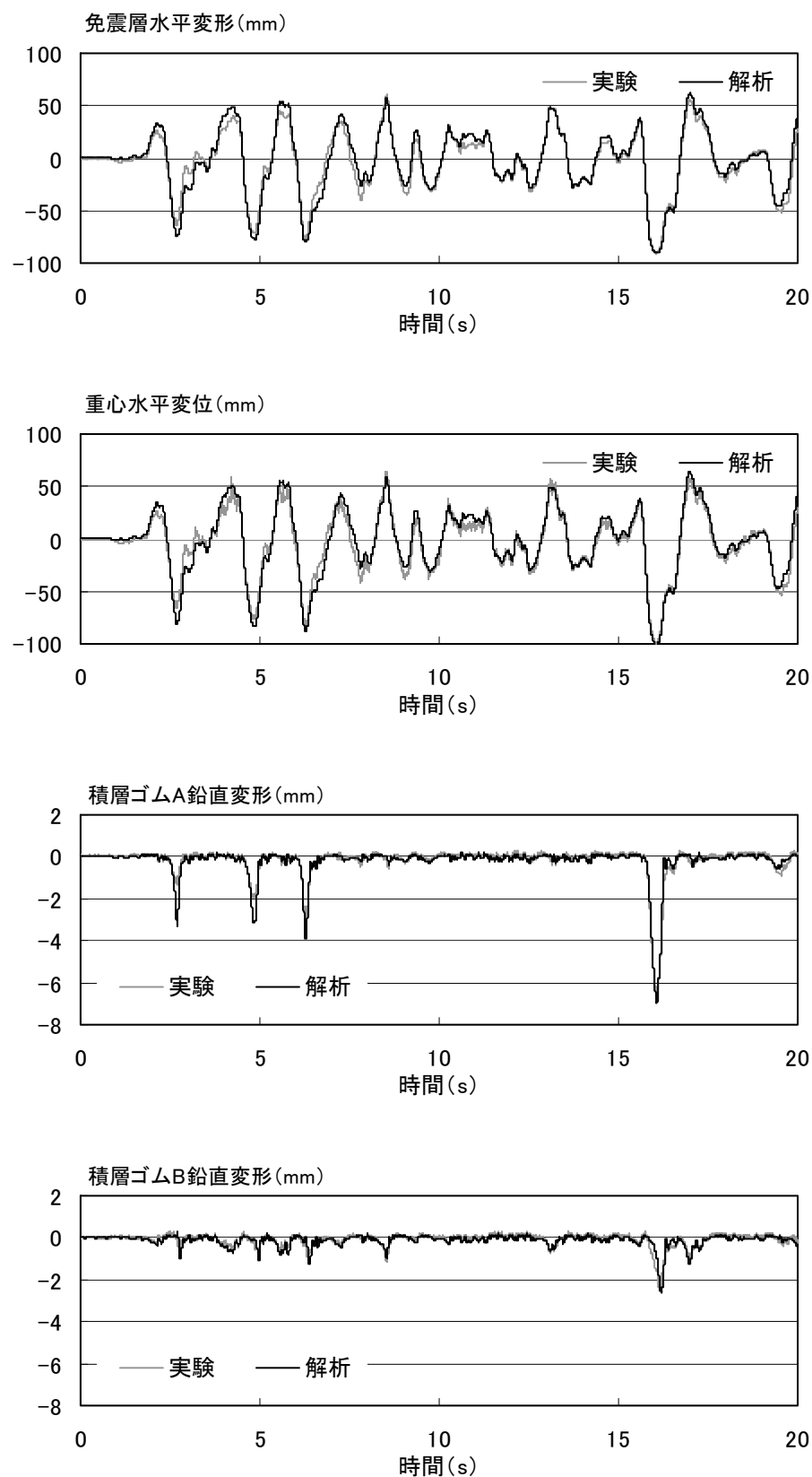


図 5.7 解析結果と実験結果の比較：ケース① $2.5 \times L2$ 、変形の時刻歴波形

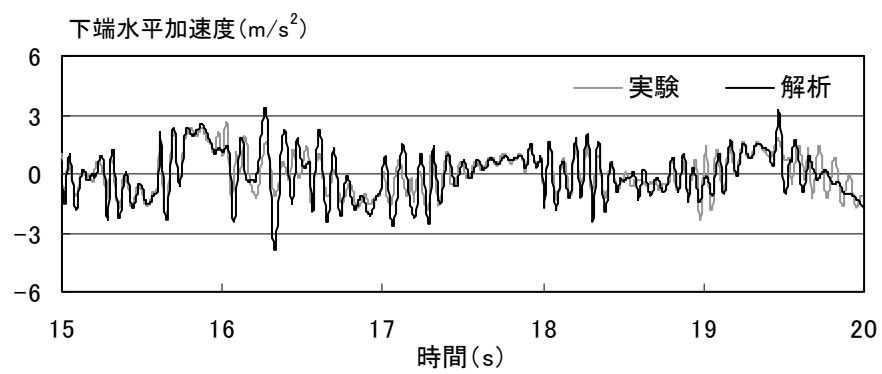
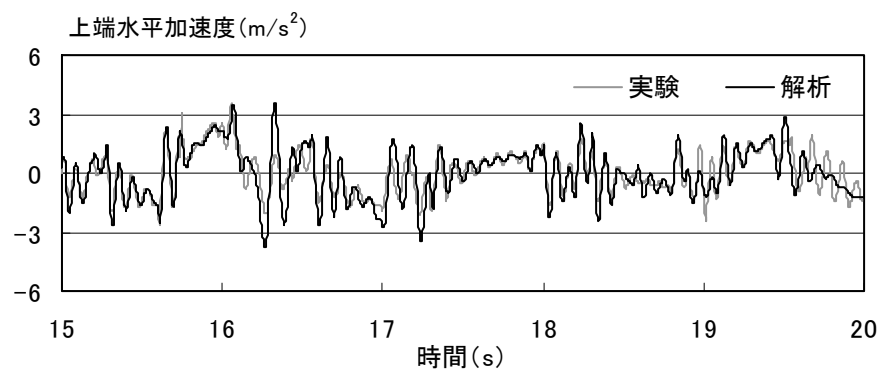
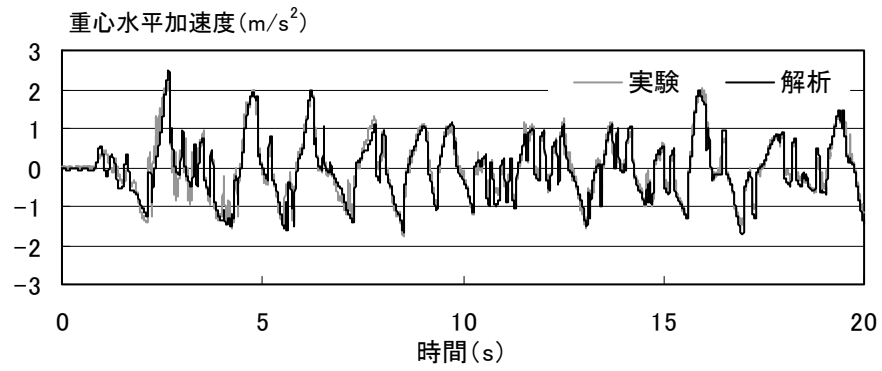
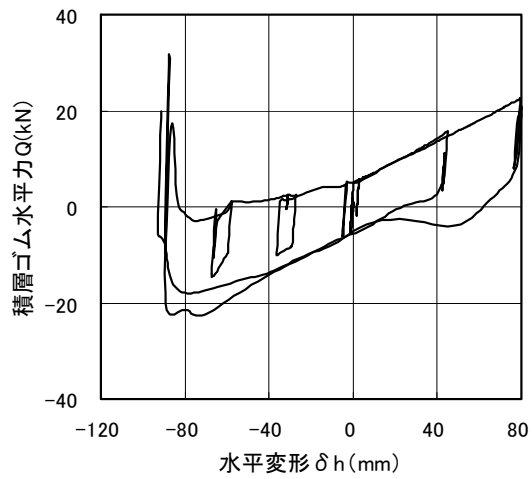
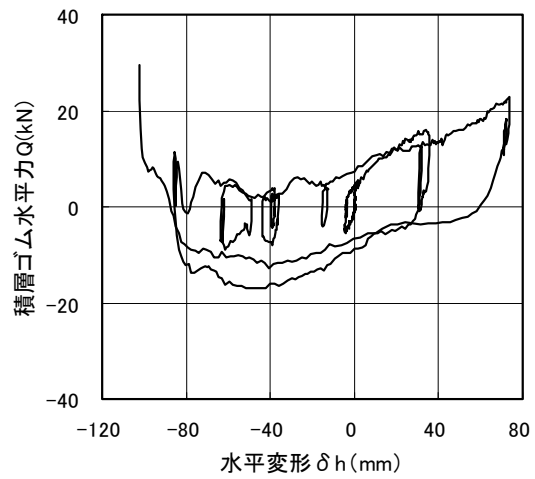


図 5.8 解析結果と実験結果の比較：ケース① $2.5 \times L2$ 、加速度の時刻歴波形

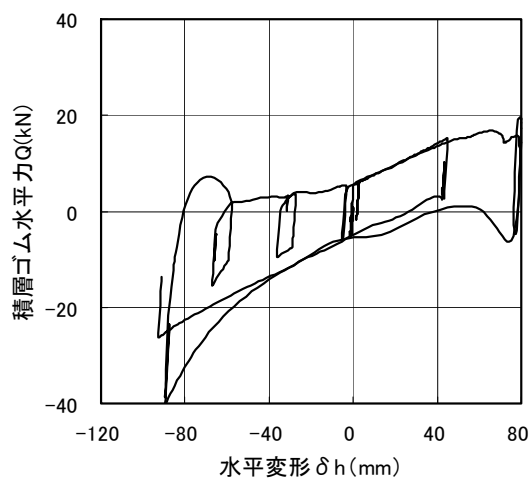


解析

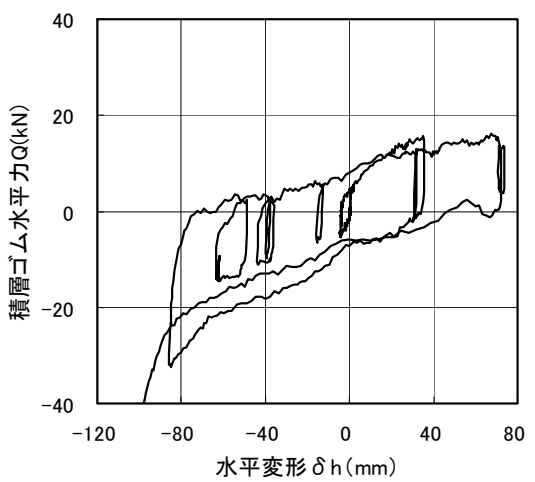


実験

積層ゴム A



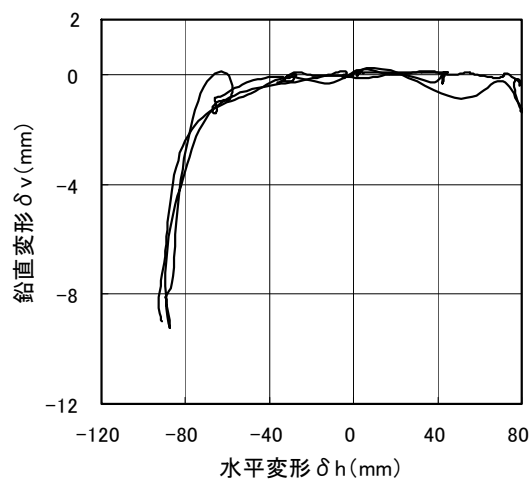
解析



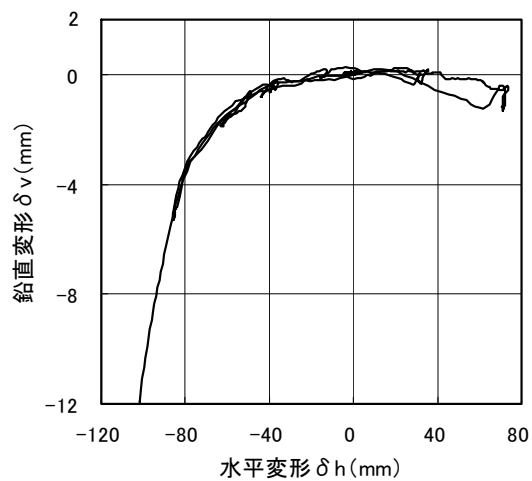
実験

積層ゴム B

図 5.9 解析結果と実験結果の比較：ケース① $3.0 \times L2$ 、 $Q-\delta h$ 曲線

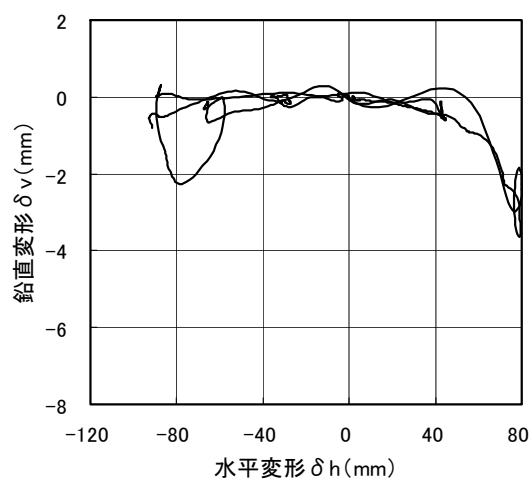


解析

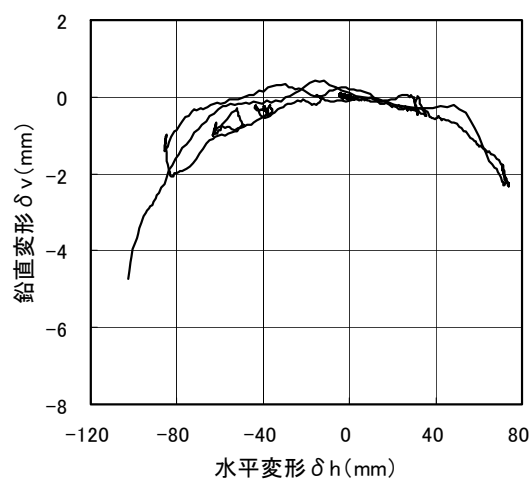


実験

積層ゴム A



解析



実験

積層ゴム B

図 5.10 解析結果と実験結果の比較：ケース①3.0×L2、 δv - δh 曲線

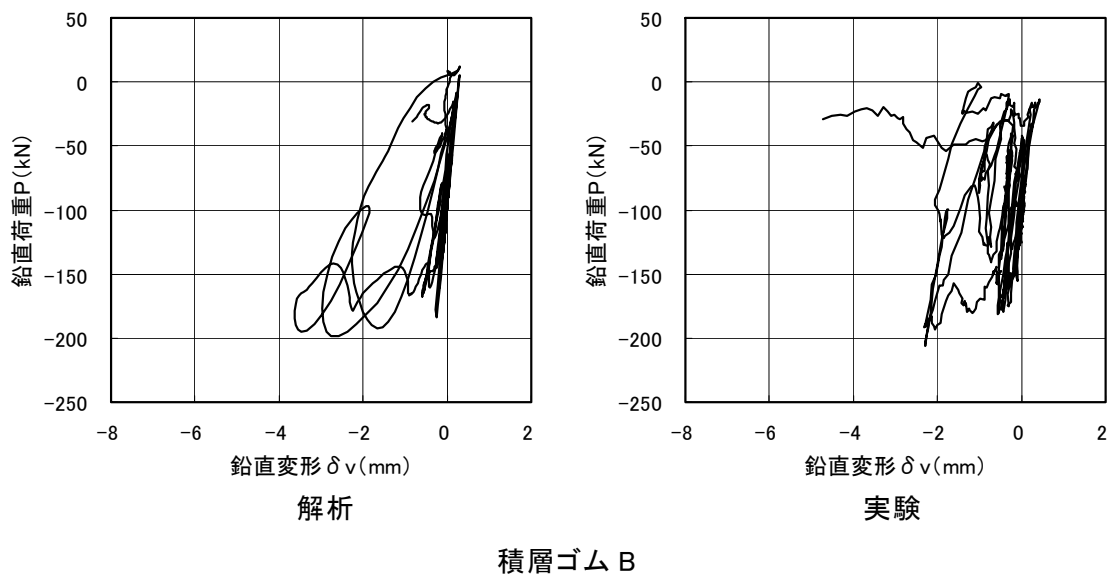
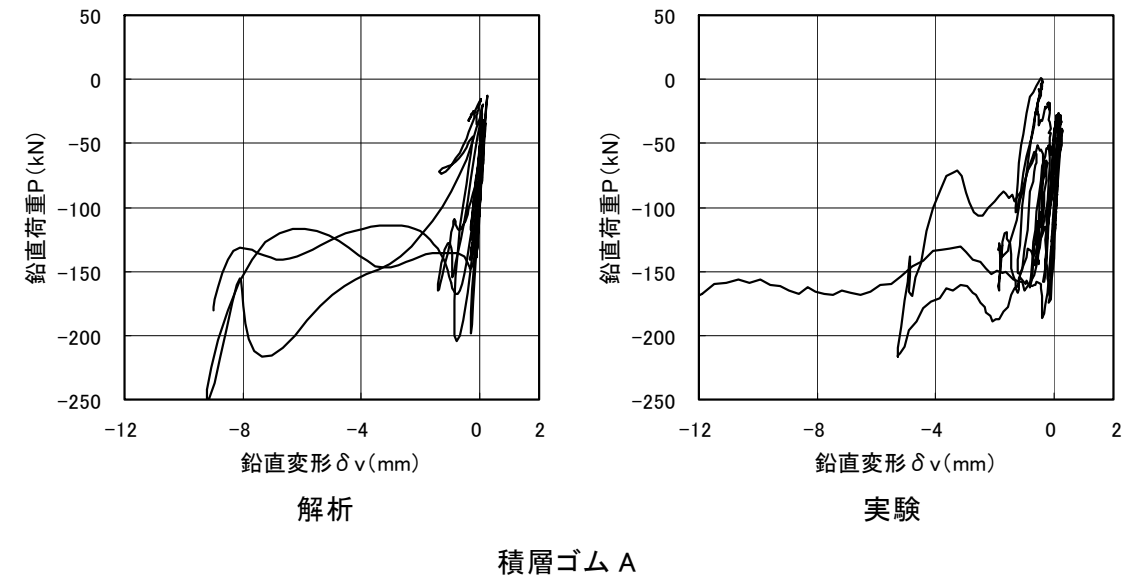


図 5.11 解析結果と実験結果の比較：ケース① $3.0 \times L2$ 、 $P-\delta v$ 曲線

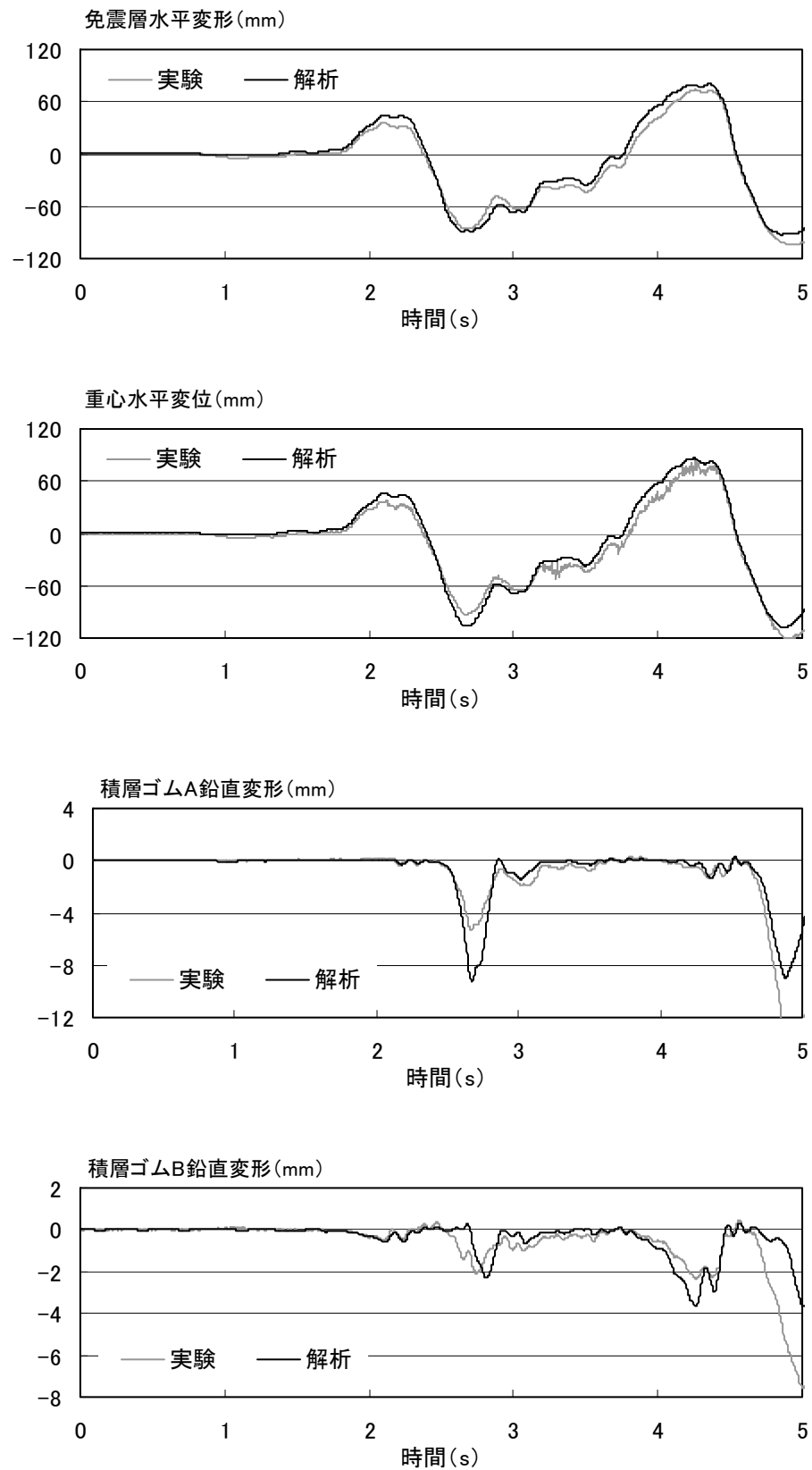


図 5.12 解析結果と実験結果の比較：ケース① $3.0 \times L2$ 、変形の時刻歴波形

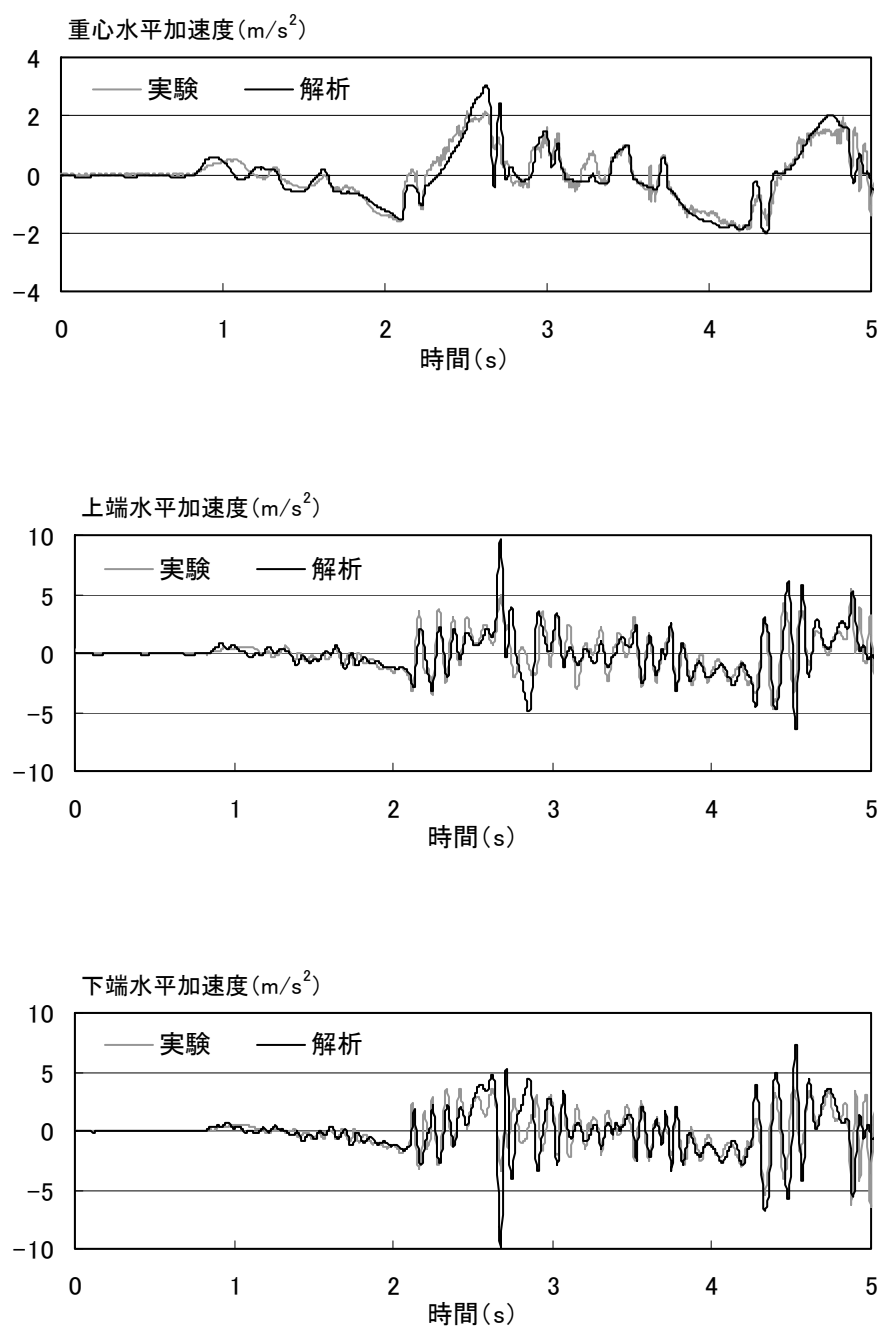


図 5.13 解析結果と実験結果の比較：ケース① $3.0 \times L2$ 、加速度の時刻歴波形

5.6.3 修正マクロモデルを考慮しない解析との比較

提案手法の有効性を確認するため、修正マクロモデルを考慮しない従来の終局挙動解析法との比較を行った。従来の終局挙動を対象とした解析では、大変形域でのハードニング現象を表す水平ばね及び引張り降伏を考慮した鉛直ばねが適用されるのが一般的である (5.1)、(5.2)。ここでは、鉛プラグの特性は提案手法と同じモデルとするが、天然ゴム系積層ゴムの水平復元力特性として修正マクロモデルを用いず、せん断ばね特性に用いた大変形せん断履歴則を直接適用することとした。また、その結果として積層ゴムに引張り変形が生じることを想定し、天然ゴム系積層ゴムの鉛直復元力特性として、図 5.14 に示す引張り降伏を考慮した 3 折線非線形弾性ばねを用いた。以下では上述の手法を従来手法と呼ぶ。

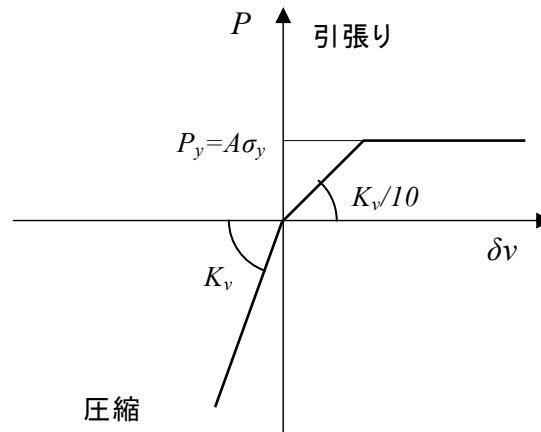


図 5.14 天然ゴム系積層ゴムの鉛直復元力特性

従来手法の精度を確認するため、引張り破断により終局に至ったケース②について、加振レベル $3.5 \times L2$ を対象とした数値解析を実施した。解析に際しては、せん断弾性係数 G を 0.441MPa (4.5kg/cm^2) に、せん断ばねのパラメータ S_5 を 0.15 に、減衰定数を 0.3% に修正した他は、表 5.1 の設計値及び表 5.2 のパラメータを用いることとした。図 5.15～5.17 に、 $Q-\delta h$ 曲線、 $\delta v-\delta h$ 曲線及び時刻歴波形について、解析結果と実験結果を比較して示す。これより、 $Q-\delta h$ 曲線では、せん断履歴則を用いたことにより、水平力のハードニングと繰り返しに伴う剛性低下及び除荷時履歴ループの膨らみが表現されている。さらに、面圧依存性を考慮した鉛プラグ特性を用いているため、振幅に依存して履歴ループの幅が変動している様子が表現されている。また、 $\delta v-\delta h$ 曲線より、積層ゴム A で生じた沈み込み変形を表現できないものの、引張り変形が生じた積層ゴム B の挙動が概ね再現されている。時刻歴波形についても解析と実

験は非常によく一致しており、従来手法によって、積層ゴムが引張り変形を受ける場合の終局挙動を概ね追跡できる。

次に、提案手法との比較を目的として、従来手法によるケース①の加振レベル $2.5 \times L2$ を対象とした数値解析を実施した。解析条件は提案手法で用いた条件（5.6.1 項参照）と同一である。図 5.18 に、従来手法による解析から得られた各積層ゴムの $Q-\delta h$ 曲線、 $\delta v-\delta h$ 曲線、 $P-\delta v$ 曲線を示す。これより以下のことが指摘できる。

$Q-\delta h$ 曲線：せん断履歴則を用いたことにより、水平力のハードニングと除荷時の履歴ループの膨らみが表現されているが、積層ゴム A と積層ゴム B の曲線形状に明確な差異は認められない。図 5.4 の実験結果との比較によれば、ハードニングが生じた積層ゴム B については解析と実験は概ね一致するものの、水平力の低下が生じた積層ゴム A については負側変形時の曲線形状が大きく異なっている。

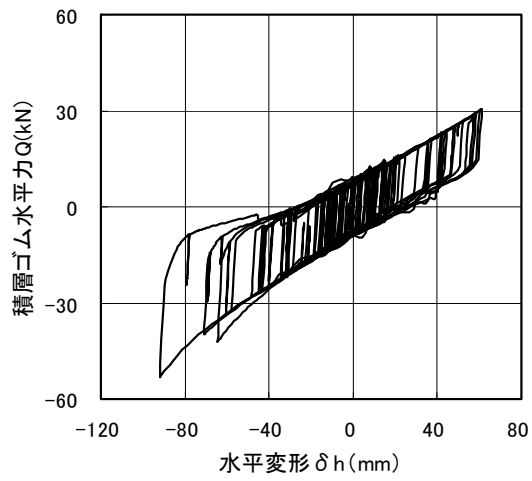
$\delta v-\delta h$ 曲線、 $P-\delta v$ 曲線：圧縮側の鉛直復元力特性を線形としているため、その特性に対応した微小な沈み込み変形が生じている。一方、積層ゴム B で引張り降伏が生じており、負側変形時に最大 1mm 程度の引張り変形が生じている。図 5.5、5.6 の実験結果との比較では、大変形時の沈み込み変形が大きく異なっている。

図 5.19 に、積層ゴム A 及び積層ゴム B の鉛直変形、重錘の重心と下端の水平加速度について、提案手法による解析と実験の時刻歴波形を示す。積層ゴム A の鉛直変形を比較すると、実験で大きな沈み込み変形が生じた部分において、解析でも僅かな沈み込み変形が生じているが、その変形量が大きく異なっている。一方、積層ゴム B の鉛直変形を比較すると、実験で沈み込み変形が生じている部分において、解析では引張り変形が生じている箇所が認められる。特に 2.5 秒及び 16 秒付近では引張り変形が 1mm 程度と大きい。重心の水平加速度を比較すると、実験での加速度が 2m/s^2 程度で極大となる 2.5 秒、5 秒、6 秒、16 秒付近において、解析の加速度が実験を上回っている。特に 2.5 秒付近では解析の加速度が約 1.5 倍の 3m/s^2 に達している。これは解析において両積層ゴムにハードニングが生じたため、免震層全体の等価水平剛性が実験よりも大きくなり、固有周期が短くなったことに起因すると推察される。下端の水平加速度を比較すると、解析では、積層ゴムに引張り変形が生じた 16 秒付近で重錘の着地に伴う加速度が生じており、その後約 2 秒間にわたって振動の位相が実験と比較してずれている。従来手法による解析では、本来積層ゴムに沈み込み変形が生じる部分において引張り変形が生じる結果となり、上部構造の応答特性にも大きな差異が生じることが分かる。

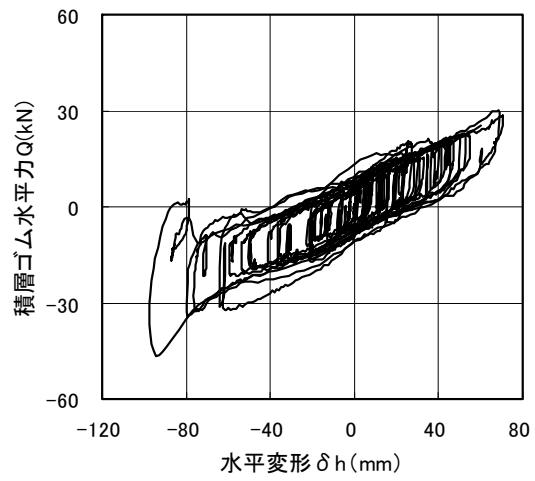
図 5.20 に、提案手法と従来手法の解析結果及び実験結果の免震層水平力(Q_h)－水平

変形(δh)曲線を示す。図中には、第 2 章で定義した塔状比によって定まる剛体の静的浮き上がり限界水平力 Q_{up} を示している。これより、提案手法では、負側の最大変形時に Q_h が頭打ちとなり概ね Q_{up} を下回っている。また、実験結果の $Q_h-\delta h$ 曲線との合致度も高い。一方、従来手法では、 Q_h に若干のハードニングが生じており、負側変形時に Q_{up} を上回っている部分が認められる。第 2 章で述べたとおり、免震建物の終局時における上部構造の運動パターンは、 Q_{up} と Q_h の大小関係に大きく依存し、 $Q_{up} < Q_h$ では基本的に積層ゴムに引張り変形が生じる浮き上がり型、 $Q_{up} > Q_h$ では積層ゴムに沈み込み変形が生じる沈み込み型となる。よって、従来手法では、本来沈み込み型の終局挙動を示すケースが、浮き上がり型という正反対の結果として評価される可能性がある。

以上より、上部構造の運動パターンを含めた免震建物の終局挙動を予測するためには、免震層水平力を高精度に評価する解析手法が必要である。特に、積層ゴムの座屈破壊による終局挙動を対象とする場合、過大な圧縮荷重下で大変形を受ける積層ゴムの終局挙動を評価し得る本提案手法が有効である。

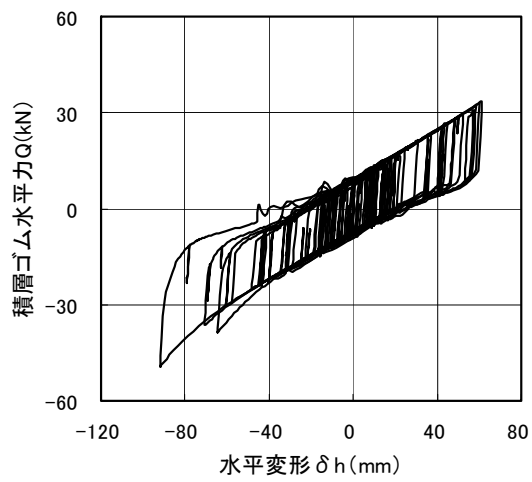


解析

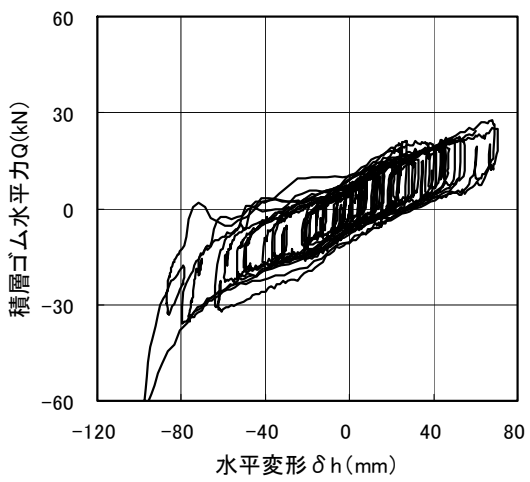


実験

積層ゴム A



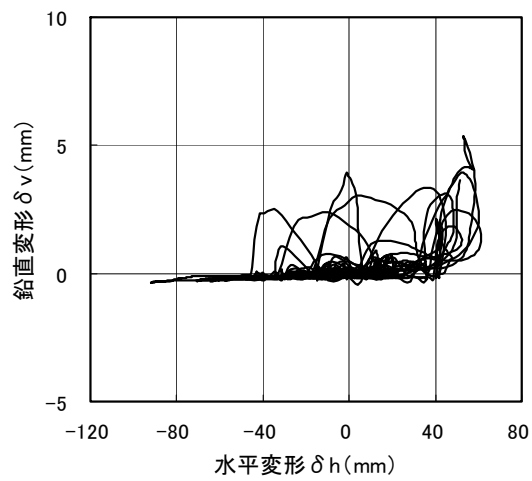
解析



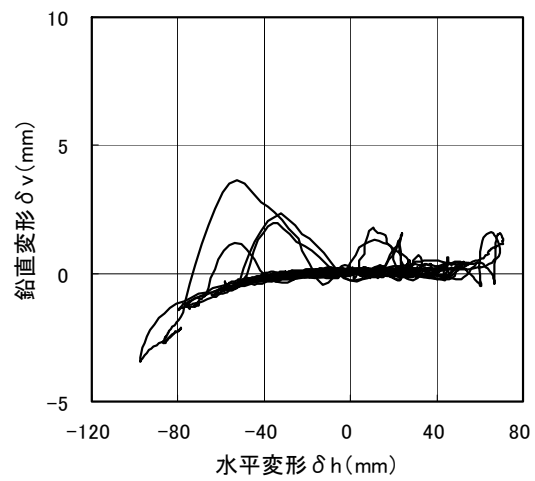
実験

積層ゴム B

図 5.15 解析結果と実験結果の比較：ケース② $3.5 \times L2$ 、 $Q-\delta h$ 曲線

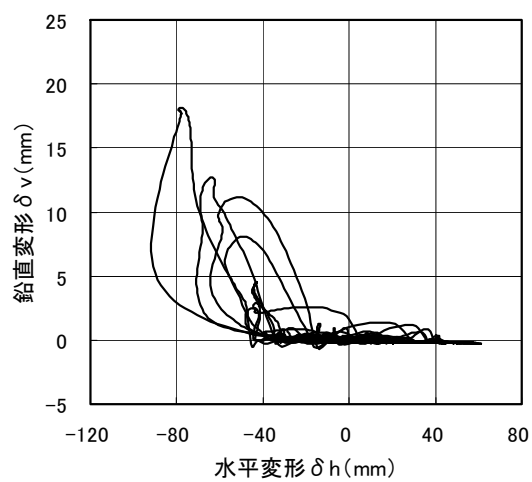


解析

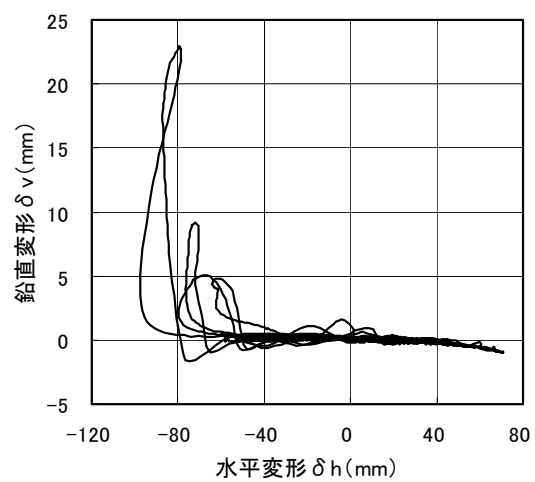


実験

積層ゴム A



解析



実験

積層ゴム B

図 5.16 解析結果と実験結果の比較：ケース②3.5×L2、 δv - δh 曲線

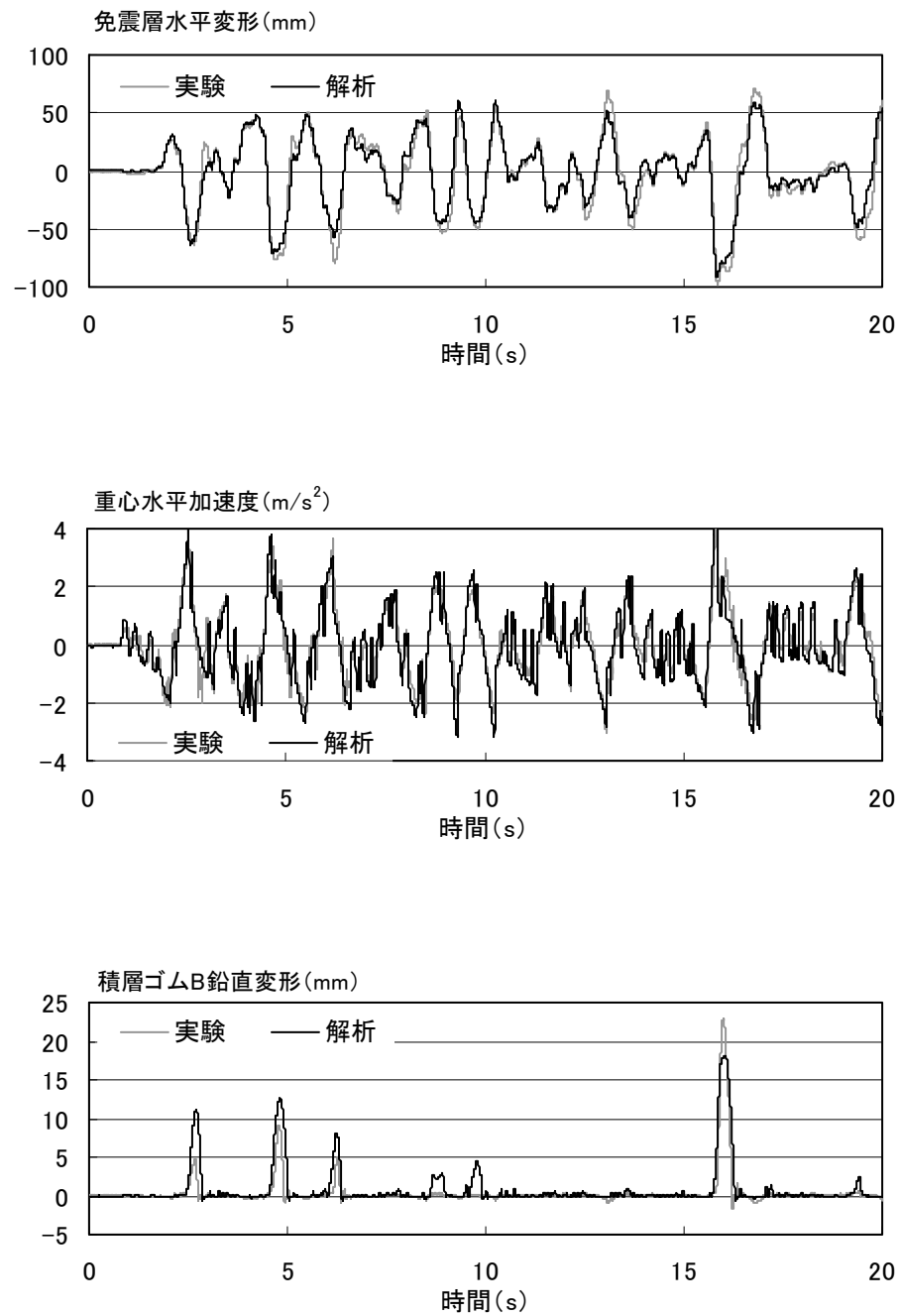
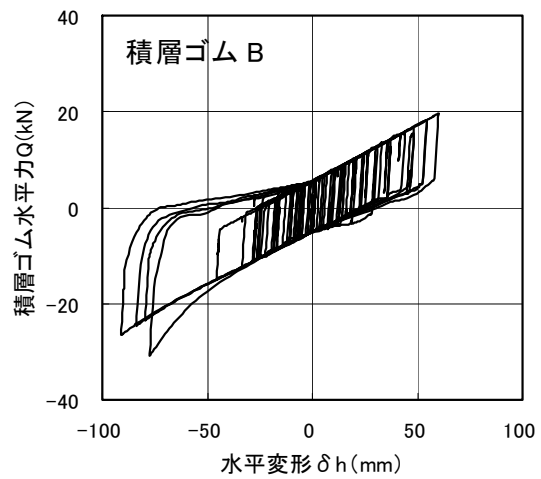
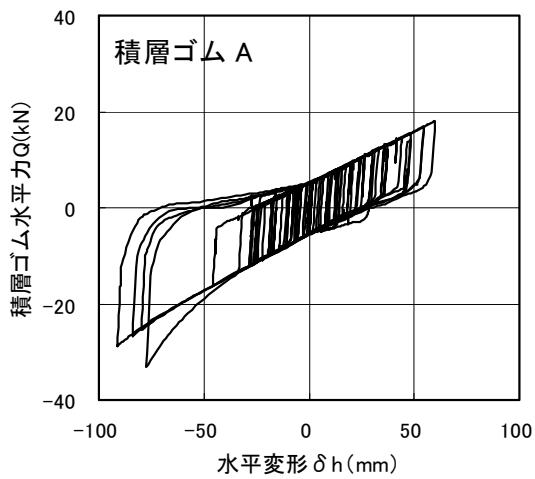
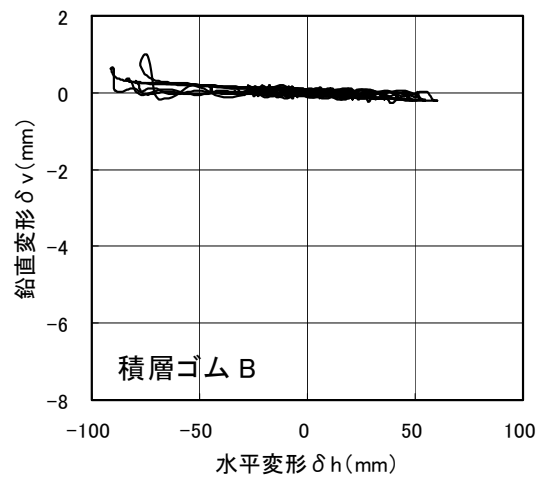
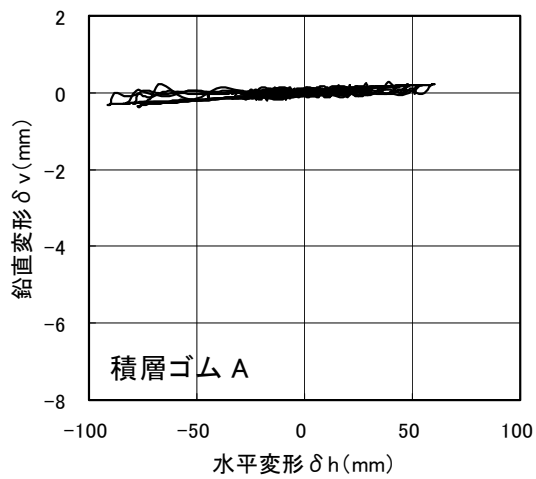


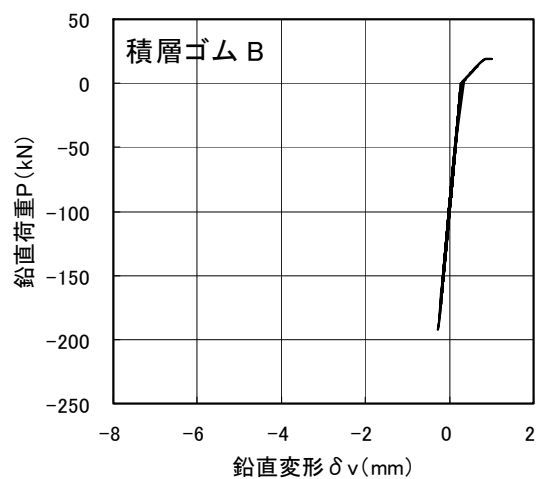
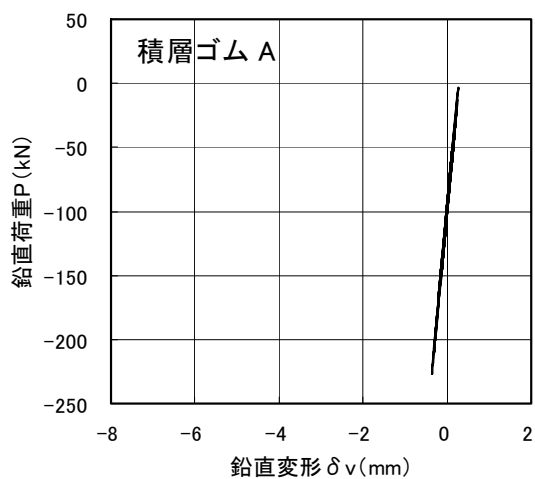
図 5.17 解析結果と実験結果の比較：ケース② $3.5 \times L2$ 、時刻歴波形



$Q-\delta h$ 曲線



$\delta v-\delta h$ 曲線



$P-\delta v$ 曲線

図 5.18 従来手法による解析結果

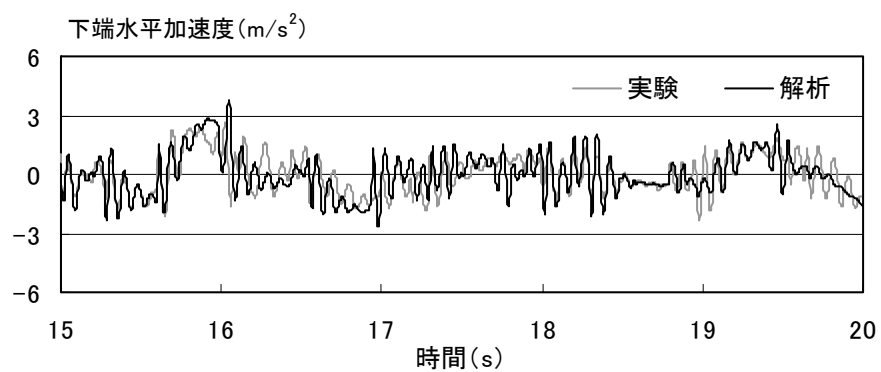
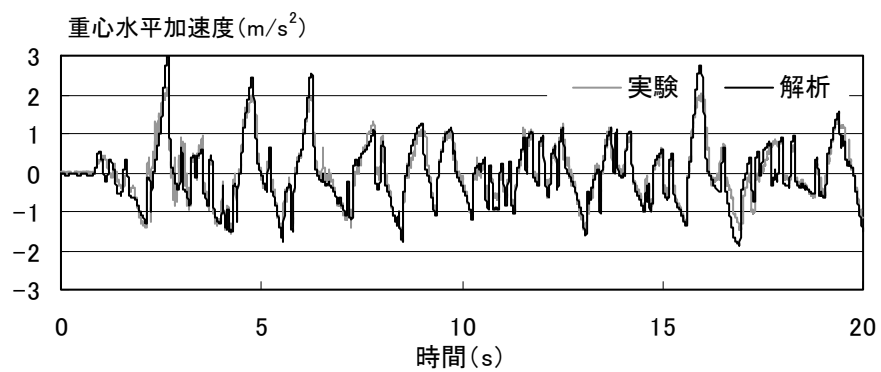
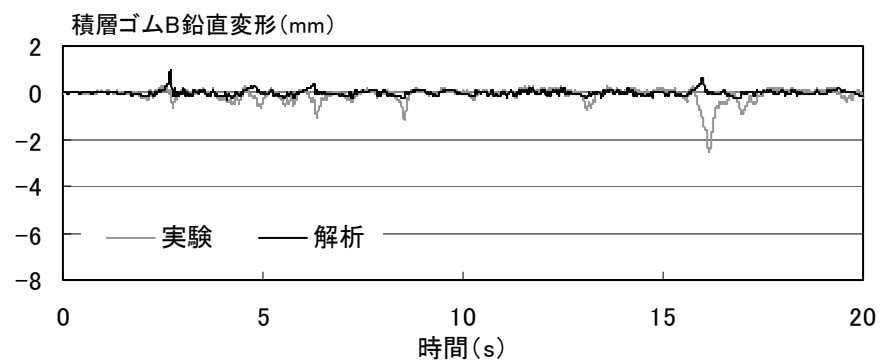
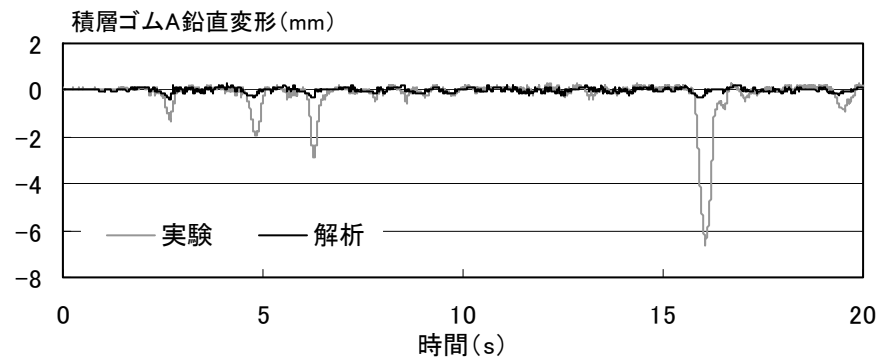


図 5.19 従来手法による解析結果と実験結果の比較

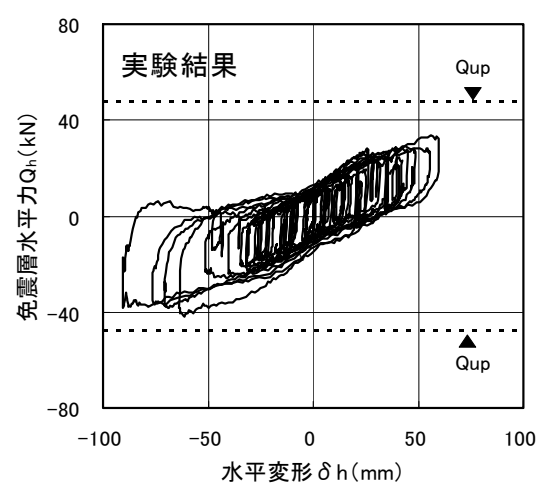
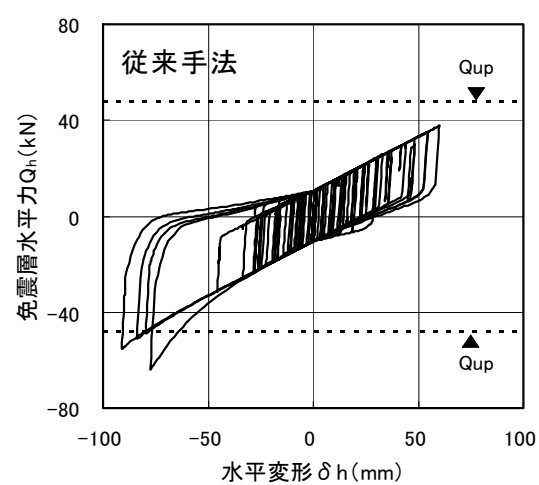
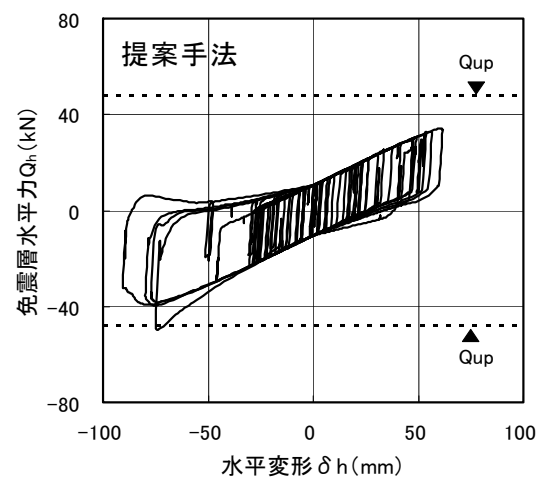


図 5.20 免震層水平力－水平変形曲線の比較

5.7 まとめ

積層ゴムで支持した免震建物が設計レベルを超えるような地震動を受ける場合、過大な水平変形下で積層ゴムに座屈破壊が生じ建物が終局に至ることが予想される。本章では、そのような免震建物の終局挙動を予測できる時刻歴応答解析法を提示し、振動台実験の数値解析並びに修正マクロモデルを考慮しない従来一般に採用されている終局地震応答解析法（従来手法）との比較を行い、解析手法の妥当性及び有効性を検討した。

提案手法を要約すると以下の通りとなる。積層ゴムの水平特性及び鉛直特性を修正マクロモデルによって表し、修正マクロモデルのせん断ばねの特性として、大変形域でのハードニングや繰り返しに伴う剛性低下等を表すせん断履歴則を採用した。運動方程式を解く数値積分法としては、修正マクロモデルでは剛性のフィードバックが難しいため、復元力を直接フィードバックできる中央差分法（衝撃加速度法）を用いた。本章から得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 振動台実験の数値解析結果より、大変形下において、過大な鉛直荷重が生じる積層ゴムにおける水平力の低下と負勾配の発生及び沈み込み変形の増大、鉛直荷重が低下する積層ゴムにおける水平力のハードニング等の非線形挙動を模擬することができた。
- (2) 従来手法による解析では、本来積層ゴムに沈み込み変形が生じる部分において引張り変形が生じる結果となり、積層ゴムの座屈破壊で終局となるケースを、引張り破断で終局と評価してしまう可能性がある。建物設計において重要な安全余裕度を把握するためには、終局挙動の定量的な評価が必須であり、その意味で、従来手法はその要求に対応することができない。一方、本手法は、積層ゴムの座屈破壊が想定される場合、特に有効である。

第 5 章参考文献

- 5.1) Ishida K, Yabana S, Yoneda G, Suhara J, Yoshikawa K : Analytical study on ultimate response characteristics of base isolated structure. 12th SMiRT, Vol.K2, pp.309-314, 1993.
- 5.2) 二村有則、竹中康雄、吉川和秀、高岡栄治：塔状免震建物の終局挙動に関する解析的研究 その 1 積層ゴムの引抜きを対象とした解析手法、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.841-842、2005.9.
- 5.3) 八坂厚彦、水越熏、飯塚真巨、高林勝人：形状係数をパラメータとした積層ゴムの限界特性実験（その 1 復元力特性）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、pp.599-600、1991.9.
- 5.4) 水越熏、八坂厚彦、飯塚真巨、高林勝人：形状係数をパラメータとした積層ゴムの限界特性実験（その 2 破壊限界特性）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、pp.601-602、1991.9.
- 5.5) 山本祥江、菊地優、越川武晃、上田正生：積層ゴムの大変形領域の特性を考慮した免震建物の地震時挙動、構造工学論文集 Vol.52B、pp.221-229、2006.3.
- 5.6) Koh, C. G. and Kelly, J. M.: A simple mechanical model for elastomeric bearings used in base isolation, Int. J. Mech. Sci. 30, 1988, pp.933-943.
- 5.7) 日本ゴム協会 免震用積層ゴム委員会編：設計者のための免震用積層ゴムハンドブック、理工図書、2000.
- 5.8) 高岡栄治、引田真規子、竹中康雄：端部回転を考慮した積層ゴムの力学挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.909-910、2007.8.
- 5.9) 柴田明徳：最新耐震構造解析、最新建築学シリーズ 9、森北出版.
- 5.10) 日本建築学会編：免震構造設計指針、pp.195-200、2001.

第6章 免震建物の終局地震応答解析

6.1 はじめに

第2章では、振動台実験の結果に基づき上部構造の運動パターンや積層ゴムの挙動に着目した検討を行い、免震建物の終局挙動について一連の知見を得た。また、第5章では、第3章で提案した積層ゴムモデルを用いた終局挙動解析法により振動台実験の数値解析を行い、手法の妥当性を確認した。本章では、これらの知見を活用し、実際の免震建物が極限的な地震動を受けた時の終局挙動を把握するため、免震建物の終局地震応答解析を実施した。解析では、いくつかの代表的な免震建物モデルを設定し、第2章の表2.1で示した各種要因の影響を考慮し、建物高さ、積層ゴムの配置、入力地震動等の要因が終局挙動に与える影響について検討した。

6.2 建物モデルの設定

解析対象モデルの設定に際しては、現在建設されている免震建物の特性を幅広く網羅することを考慮した。免震建物を表6.1に示す第1期から第4期の4つの年代に分類し^{6.1)}、一般建物への適用が少ない第1期を除く各年代を代表する免震建物を想定した建物モデルを設定した。下記に建物モデルの概要を示すとともに、表6.2にそれらの諸元を比較して示す。また、図6.1、6.2に建物の立面、平面及び積層ゴムの配置を示す。

【第2期免震建物】

・5Fモデル

上部構造総質量 4259ton、塔状比 1.25

免震層 天然ゴム系積層ゴム（NRB）＋鉛ダンパ

NRB（せん断弾性係数 0.441MPa、直径 800mm、ゴム総厚さ 162mm、14 台）

平均長期面圧 5.93MPa、免震周期（積層ゴム剛性のみによる周期）2.94s、免震層降伏せん断力係数 0.05、水平クリアランス 0.4m

【第3期免震建物】

・10Fモデル

上部構造総質量 8123ton、塔状比（ H/B ） 2.5

免震層 天然ゴム系積層ゴム（NRB）＋鉛ダンパ

NRB（せん断弾性係数 0.392MPa、直径 950mm、ゴム総厚さ 198mm、14 台）

平均長期面圧 8.02MPa、免震周期（積層ゴム剛性のみによる周期）4.04s、免震

層降伏せん断力係数 0.035、水平クリアランス 0.5m

・ 15F モデル

上部構造総質量 12570ton、塔状比 (H/B) 3.75

免震層 天然ゴム系積層ゴム (NRB) + 鉛ダンパ

NRB (せん断弾性係数 0.392MPa、直径 1100mm、ゴム総厚さ 200mm、14 台)

平均長期面圧 9.26MPa、免震周期 (積層ゴム剛性のみによる周期) 4.36s、免震

層降伏せん断力係数 0.035、水平クリアランス 0.5m

【第 4 期免震建物】

・ 23F モデル

上部構造総質量 24530ton、塔状比 (H/B) 4.88

免震層 天然ゴム系積層ゴム (NRB) + 鉛ダンパ

NRB (せん断弾性係数 0.392MPa、直径 1400mm、ゴム総厚さ 279mm、14 台)

平均長期面圧 11.15MPa、免震周期 (積層ゴム剛性のみによる周期) 5.66s、免震

層降伏せん断力係数 0.035、水平クリアランス 0.7m

・ 23F 修正モデル

上部構造総質量 24530ton、塔状比 (H/B) 4.88

免震層 天然ゴム系積層ゴム (NRB) + 鉛ダンパ

NRB (せん断弾性係数 0.392MPa、直径 1200mm、ゴム総厚さ 240mm、21 台)

平均長期面圧 10.12MPa、免震周期 (積層ゴム剛性のみによる周期) 5.00s、免震

層降伏せん断力係数 0.035、水平クリアランス 0.7m

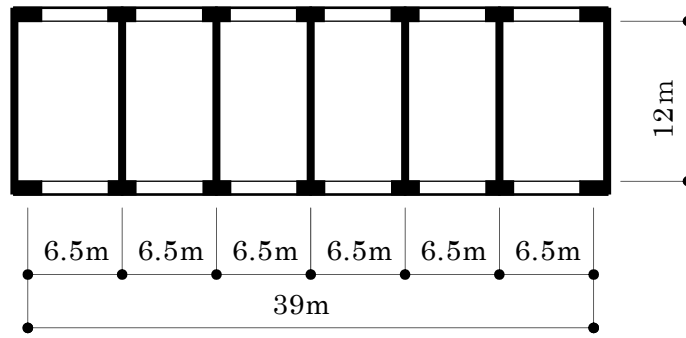
建物モデルは、5F モデル、10F モデル、15F モデル、23F モデルの 4 つで、前者 3 つについては文献 6.2) に示された同名のモデルを、23F モデルについては 60m を超える実高層免震建物のモデルをそれぞれ参考になっている。免震装置は、すべて天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパの組合せとした。積層ゴムについてはメーカーの標準品を参考にその形状を設定した^{6.3)}。また、鉛ダンパは、1 台の特性を初期剛性 12000kN/m、降伏荷重 100kN、降伏後剛性 0kN/m、降伏変位 8.3mm として、所定の降伏せん断力係数を満足するように個数を適宜調整した。積層ゴムの配置は建物両端に 2 列に配置することを基本とする (2 列配置)。23F 修正モデルは積層ゴム配置の影響を比較するモデルであり、23F モデルの積層ゴム形状を変更し 3 列配置としている (3 列配置)。表 6.2 より、年代の経過に従い建物の規模すなわち建物高さと総質量が大きくなり、塔状比が大きくなる。また、積層ゴムの直径は大きくなるが、面圧が高くなり免震周期が長周期に設定されている。

表 6.1 免震建物の分類と特徴

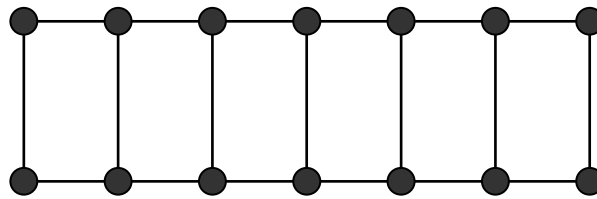
年代分類	免震建物の特徴
第 1 期 草創期 (～1988 年)	天然ゴム系積層ゴム＋別置きダンパのシステム、 ゴム材料 G4.5 と G6 が主流、 $C_B=0.15$ 以上
第 2 期 阪神・淡路大震災前 (1989～1994 年)	集合住宅への適用、中間階免震への適用 $C_B=0.15$ 以下可能
第 3 期 阪神・淡路大震災後 (1995～1999 年)	免震システム多様化、ゴム材料 G4 が主流 積層ゴム高面圧化・長周期化・高塔状化の傾向
第 4 期 建築基準法改正後 (2000 年～)	告示免震の創設、免震部材を指定建築材料に 指定、超高層建物への適用本格化

表 6.2 建物モデル諸元一覧

		年代分類				
		第 2 期	第 3 期		第 4 期	
モデル名		5F	10F	15F	23F	23F 修正
上部 構造	階数	5	10	15	23	
	建物幅 B m	12	12	12	16.8	
	建物高さ H m	15	30	48	82	
	塔状比 H/B	1.25	2.5	3.75	4.88	
	総質量 ton	4259	8123	12570	24530	
積層 ゴム	個数	14	14	14	14	21
	直径 D mm	800	950	1100	1400	1200
	せん断弾性係数 MPa	0.441	0.392	0.392	0.392	0.392
	ゴム高さ l mm	289.6	330.4	314.2	447.2	367.6
	ゴム一層厚さ t_r mm	5.4	6.4	7.4	9.3	8.0
	ゴム層総厚さ h mm	162	198.4	199.8	279	240
	1 次形状係数 S_1	37.0	37.2	37.2	37.6	37.5
	2 次形状係数 S_2	4.94	4.79	5.51	5.02	5.00
免震 特性	面圧 MPa	5.93	8.02	9.26	11.15	10.12
	免震周期 s	2.96	4.04	4.36	5.66	5.00
	降伏せん断力係数	0.05	0.035	0.035	0.035	0.035
	クリアランス m	0.4	0.5	0.5	0.7	0.7



建物平面図



積層ゴム配置図

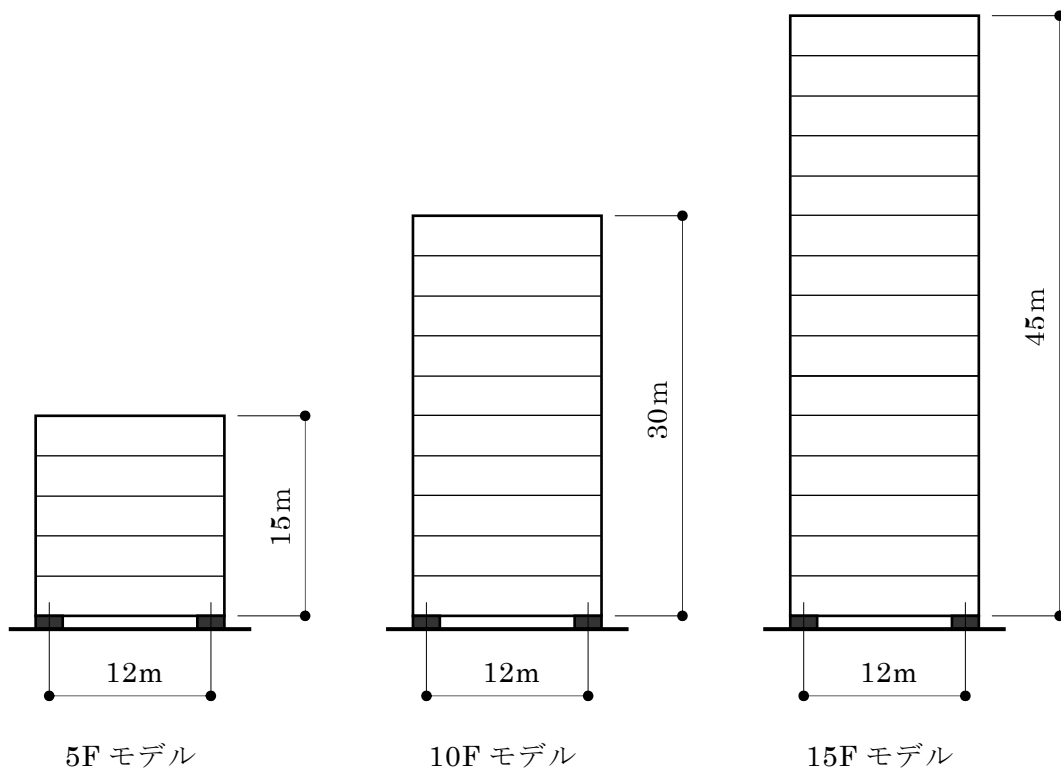


図 6.1 建物モデル概要 (5F、10F、15F モデル)

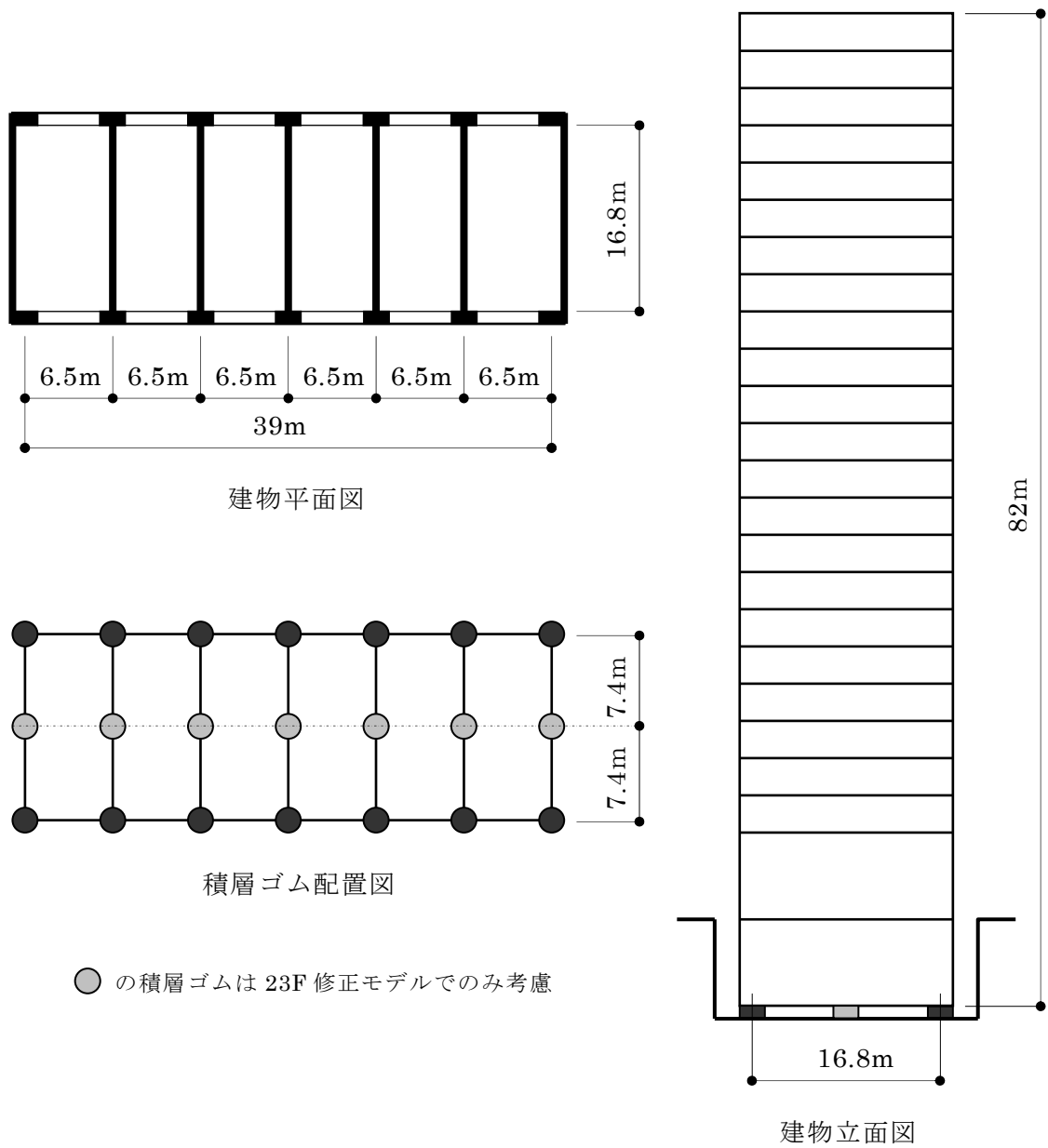


図 6.2 建物モデル概要 (23F、23F 修正モデル)

6.3 解析モデル

図 6.3 に解析モデルを示す。解析の対象とする方向は建物短辺方向であり、このうち 1 構面についてモデル化を行った。23F 修正モデルは 3 台の積層ゴムで、それ以外は 2 台の積層ゴムで支持するモデルとした。上部構造は多質点等価せん断型モデルで、各質点には水平 1 自由度を、最下層の質点のみ水平、鉛直及び回転の 3 自由度を与えた。上部構造の復元力特性は弾性とした。上部構造の復元力特性の設定に際しては、5F モデル、10F モデル、15F モデルについては文献 6.2) に示された壁方向の解析モデルの諸元を、23F モデルについては実高層免震建物の解析モデルの諸元を参考にした。表 6.3 に、上部構造基礎固定時及び免震層の積層ゴム水平剛性のみによる固有周期の一覧を示す。上部構造の減衰は、上部構造基礎固定時の水平周期に対して $h=3\%$ の内部粘性減衰を与えた。免震層については、天然ゴム系積層ゴムの水平方向及び鉛直方向の復元力特性を修正マクロモデルによって、鉛ダンパの水平復元力特性は完全弾塑性モデルによって表した。免震層水平方向の減衰は、内部粘性減衰を考慮せず履歴減衰のみとした。免震層鉛直方向の減衰は、免震層考慮の鉛直固有周期に対して 2% の内部粘性減衰を与えた。解析に用いる積層ゴムの形状・諸元は表 6.2 に、材料の設計用弾性係数は第 5 章の表 5.1 に、修正マクロモデルのパラメータは第 5 章の表 5.2 にそれぞれ示した値を用いた。

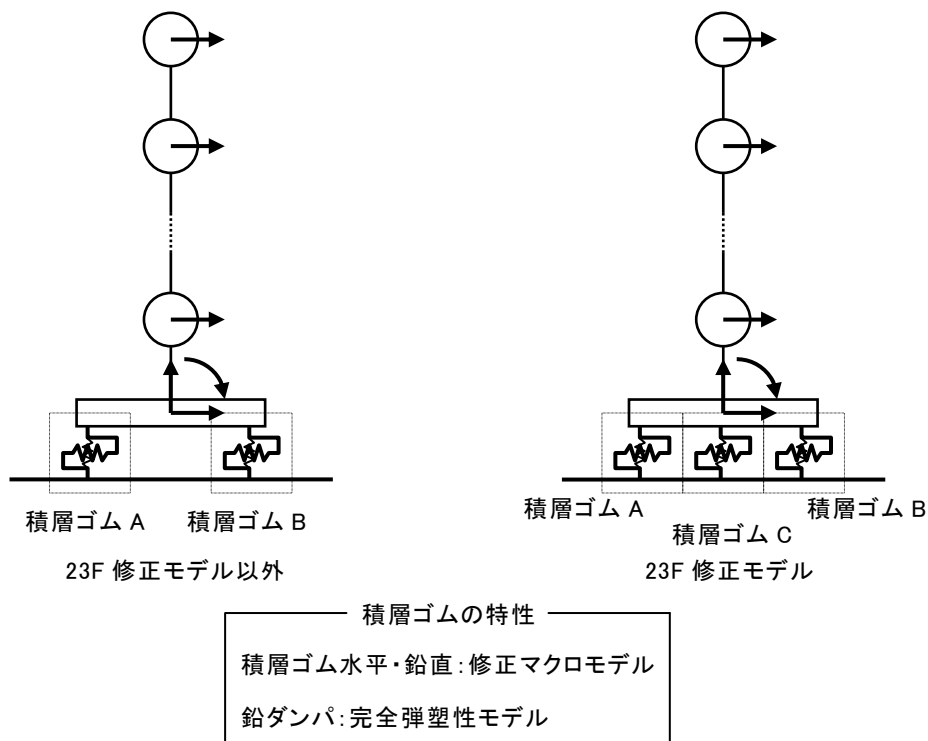


図 6.3 解析モデル

表 6.3 建物固有周期一覧

モデル名		5F	10F	15F	23F	23F 修正
基礎 固定 時	1 次	0.117	0.294	0.472	1.79	
	2 次	0.040	0.101	0.162	0.605	
	3 次	0.026	0.062	0.098	0.368	
積層 ゴム のみ	1 次	2.97	4.06	4.39	5.86	5.24
	2 次	0.092	0.212	0.329	1.15	1.14
	3 次	0.035	0.082	0.128	0.535	0.535

(単位：s)

6.4 入力地震動

入力地震動は、既往観測波、設計用模擬地震動及び巨大地震想定模擬地震動（長周期地震動）から選定した。表 6.4 に入力地震動の一覧を示す。既往観測波としては EL CENTRO-NS 波（EL_NS）、HACHINOHE-NS 波（HACHI_NS）、JMA KOBE-NS 波（KOBE_NS）を採用した。なお、EL CENTRO-NS 波及び HACHINOHE-NS 波については最大速度が 0.5m/s になるように規準化したものを用いた。設計用模擬地震動としては第 2 章の振動台実験でも用いた BCJ-L2 波を、長周期地震動としては東海・東南海地震の名古屋三の丸における推定地震動（三の丸波、SAN）^{6.4)}を採用した。図 6.4 に各地震動について、 $h=5\%$ の速度応答スペクトルを示す。JMA KOBE-NS 波では 1 秒付近の応答が、三の丸波では一般免震建物の固有周期に近い 3 秒付近の応答が卓越しており、従来の設計で多用されてきた EL CENTRO-NS 波や HACHINOHE-NS 波よりもその値が大きい。一方、BCJ-L2 波は 8 秒の長周期帯まで概ねフラットな特性を有している。

表 6.4 入力地震動一覧

分類	地震波名称	最大加速度 (m/s^2)	継続時間 (s)	時間刻み (s)
既往観測波	EL CENTRO-NS	5.11	53.76	0.02
	HACHINOHE NS	3.30	36.00	0.01
	JMA KOBE-NS	8.21	25.00	0.02
模擬地震動	BCJ-L2	3.56	120.00	0.01
長周期地震動	三の丸波	1.86	327.68	0.01

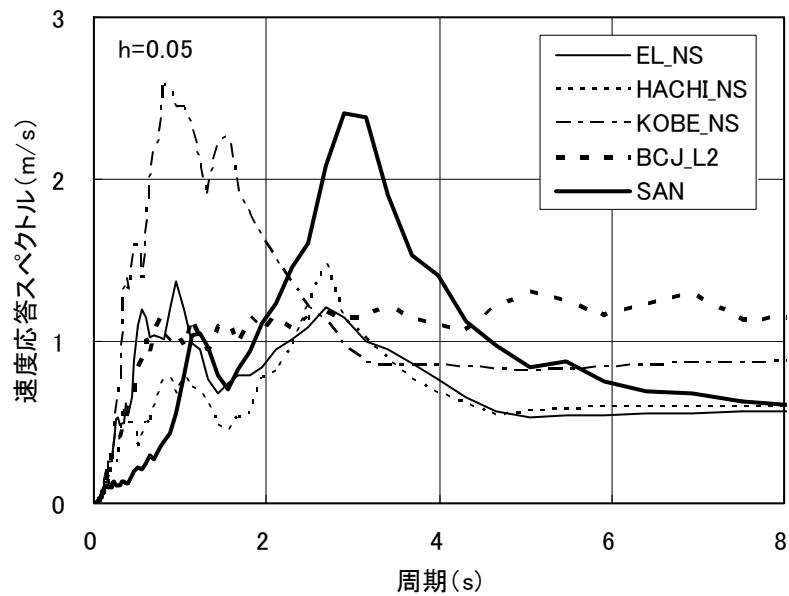


図 6.4 入力地震動の速度応答スペクトル

6.5 解析結果

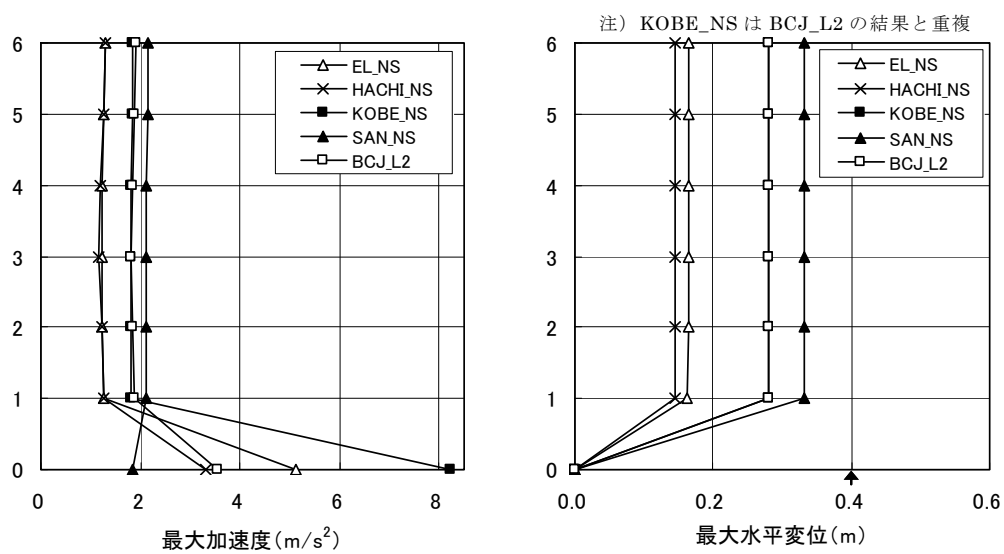
6.5.1 基本応答特性

各モデルについて 5 地震動による水平 1 方向入力の影響解析を行い、入力地震動が建物応答に及ぼす影響を把握するとともに、通常想定される地震動の範囲における修正マクロモデルの適用性を確認した。図 6.5、6.6 に、5 地震動に対する各モデルの最大水平加速度、最大水平変位の高さ方向の分布を示す。これより以下のことが分かる。

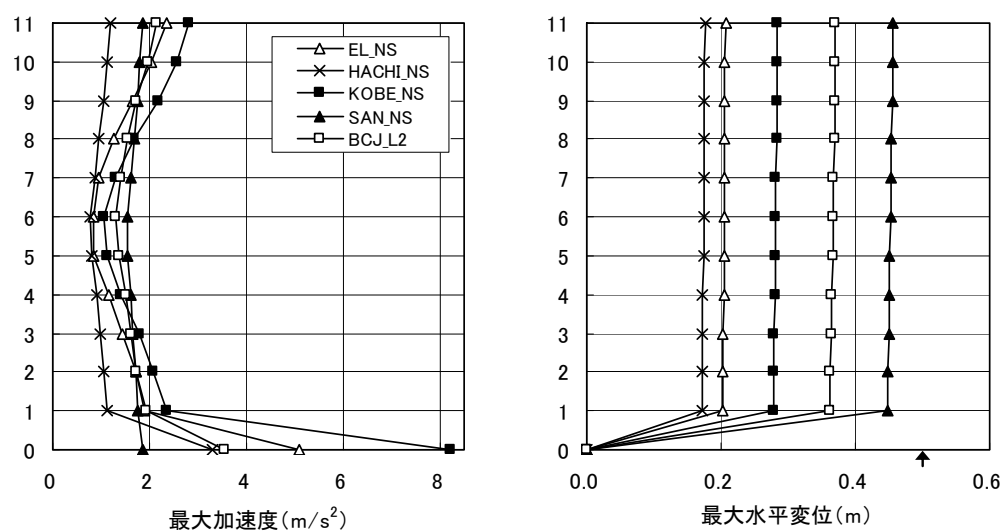
最大水平加速度：既往観測波及び BCJ-L2 波では入力加速度に対して上部構造の応答が低減されているが、三の丸波では全モデルで入力に対して上部構造の応答が増幅されている。また、5F モデルを除き、建物中間階と比較して最上層及び最下層の最大加速度が大きくなる傾向にある。これは高次振動成分の励起によるものである。

最大水平変位：5F モデル、10F モデル、15F モデルでは、最上層と最下層の変位差は非常に小さく、変位が概ね直線的に分布しているのに対して、23F モデルでは上層部における変位が増幅が顕著である。これは、表 6.3 に示したように、前者の基礎固定時の建物固有周期が比較的短周期の特性（0.1～0.5s）を有しているのに対して、後者が比較的長周期の特性（1.79s）となっているためである。免震層の最大水平変位は、免震周期の短い 5F モデルと 10F モデルでは三の丸波で、15F モデルでは三の丸波及び BCJ-L2 波で、免震周期の最も長い 23F モデルでは BCJ-L2 波で最大となる。モデルの免震周期が長くなるほど、図 6.4 の速度応答スペクトルにおいて長周期域にピークを有する地震動で水平変形が最大となる。また、免震層の最大水平変位はいずれも図中の↑印で示したクリアランス以内に収まっている。表 6.5 に、各モデルの免震層最大水平変位とそれらの値をゴム層総厚さで除した最大せん断ひずみを示すが、これらの値は 225%以下である。

免震層水平特性：図 6.7 に、積層ゴムのせん断ひずみが最も大きい 10F モデルの三の丸波入力について、積層ゴムの水平力（ Q ）－水平変形（ δh ）曲線を示す。正負の最大変形からの除荷時に履歴ループの膨らみが認められるが、積層ゴムの特性はほぼ線形と考えてよい。通常想定される地震動の範囲においては、修正マクロモデルは従来の線形モデルとほぼ同様の特性を示す。

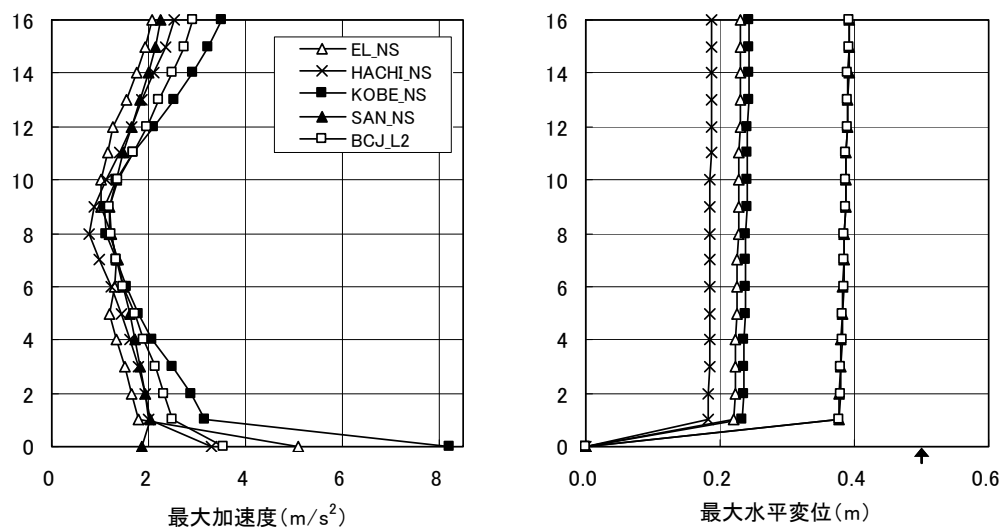


5F モデル

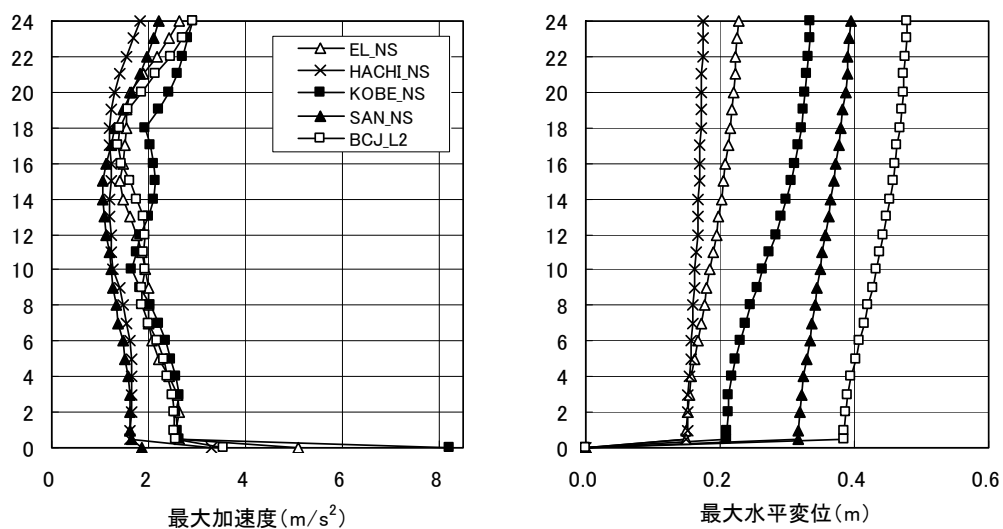


10F モデル

図 6.5 最大加速度と最大水平変位の高さ方向の分布（基本応答特性）



15F モデル



23F モデル

図 6.6 最大加速度と最大水平変位の高さ方向の分布（基本応答特性）

表 6.5 免震層最大水平変位とせん断ひずみ

モデル名	5F	10F	15F	23F
最大水平変位 (m)	0.331	0.447	0.378	0.384
最大せん断ひずみ (%)	204	225	189	138
入力波	三の丸	三の丸	BCJ-L2	BCJ-L2

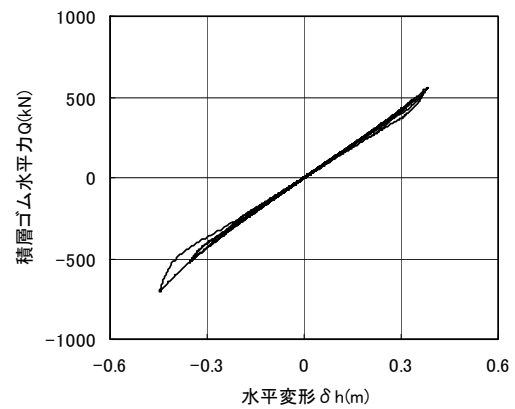
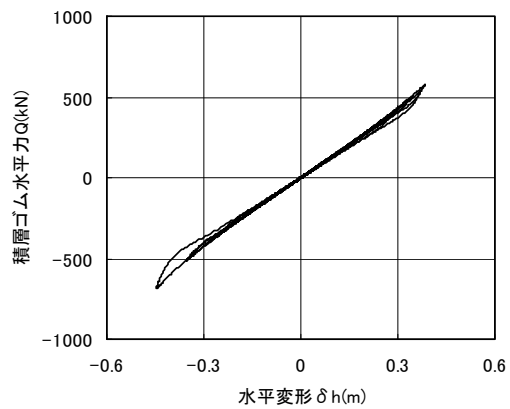


図 6.7 基本応答特性 (10F モデル、三の丸波)

6.5.2 終局挙動

積層ゴムに引張り変形あるいは過大な沈み込み変形が生じる終局挙動を確認するため、水平 1 方向入力への応答解析を行なった。入力波としては BCJ-L2 波を用い、入力レベルは、原波の最大加速度を規準として 1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍と振幅を増加させ、2.0 倍以降は 0.1 倍刻みで終局状態まで振幅を増幅させた。以下では入力レベルを「倍率×L2」と表記する。終局状態の判定は、修正マクロモデルの軸ばね特性において全断面が降伏し解析不能となった場合、又は、水平変形が積層ゴムの直径に相当する変形を超えた場合とした。

解析結果から得られた各モデルの終局入力レベルを表 6.6 に示す。これより、23F 修正モデルを除き、終局入力レベルは概ね 2.5×L2 程度となっている。図 6.8～6.10 に、各モデルについて、各入力レベルの最大水平加速度、最大水平変位の高さ方向の分布を示す。図中の最大の入力レベルは終局直前の入力レベル（終局直前レベル）を示したものである。これより以下のことが分かる。

- ・上部構造の最大加速度は入力加速度に対して低減されており、入力レベルが大きくなっても免震効果が確保されている。ただし、入力レベルが大きくなるほど、高次振動成分が励起され建物上部と下部の加速度が増幅される傾向にあり、終局直前レベルではこの傾向が顕著である。
- ・入力レベルの増大に伴い最大水平変位は増大し、5F、10F、15F モデルでは 1.5×L2 において、23F モデルでは 2.0×L2 において水平変位が免震層のクリアランスに相当する変形（図中▲印）を超えている。1.0×L2 では層間変形が小さく、上部構造は剛体的な挙動を示しているが、入力レベルが大きくなるほど層間変形が大きくなる傾向が見られる。

図 6.11～6.15 に、各モデルについて、終局直前レベルにおける免震層水平力 (Q_h)－水平変形 (δh) 曲線、積層ゴム水平力 (Q)－ δh 曲線、積層ゴム鉛直変形 (δv)－ δh 曲線を示す。 Q_h － δh 曲線には剛体の静的浮き上がり限界水平力 Q_{up} を示している。積層ゴムの 2 列配置と 3 列配置について Q_{up} は次式で与えられる^{6.5)}。

$$2 \text{ 列配置 : } Q_{up} = \frac{W}{(H/B)}$$

$$3 \text{ 列配置 : } Q_{up} = \frac{2}{3} \frac{W}{(H/B)}$$

ここで、 W は総重量、 H/B は塔状比である。表 6.7 に各モデルの 1 構面についての Q_{up} を示す。これらの図、表より以下のことが分かる。

5F モデル及び 10F モデル: 免震層水平力 Q_h は常に Q_{up} 以下であり引張り変形は生じ

ていない。両積層ゴムにおいて正側変形時に水平力のハードニングが認められる。積層ゴム B では、正側最大変形に向かうループにおいて水平力が頭打ちとなり、水平力が僅かに低下している。最大水平変形は 5F モデルで 0.79m ($\gamma=490\%$)、10F モデルで 0.89m ($\gamma=450\%$) であり、積層ゴムの直径に相当する変形 (0.8m 及び 0.95m) に対して 90%以上となっている。また、正側最大変形時に積層ゴム B の沈み込み変形が -20mm ($\epsilon=10\%$) を超えている。第 2 章の大入力時における運動パターンの分類によれば、両モデルは沈み込み型に分類されることになる。終局入力レベルにおける解析では、水平変形が直径相当の変形を超え、沈み込み変形が現実的な値を超えたため、座屈破壊による終局状態と判断した。

15F モデル及び 23F モデル： $Q_h-\delta h$ 曲線より、免震層水平力 Q_h が Q_{up} を超えている部分が認められる。それに対応して、積層ゴム A では、15F モデルで 20mm ($\epsilon=10\%$) の引張り変形が、23F モデルで 13mm ($\epsilon=5\%$) の引張り変形がそれぞれ生じている。

15F モデルでは、積層ゴム B にも 10mm 程度の引張り変形が生じているが、これは、積層ゴム A 側での着地後の浮き上がりによるものである。最大水平変形は 15F モデルで 0.90m ($\gamma=450\%$)、23F モデルで -1.17m ($\gamma=420\%$) であり、積層ゴムの直径に相当する変形 (1.1m 及び 1.4m) に対して 80%程度となっている。積層ゴム B では、いずれのモデルでも正側最大変形時に水平力が僅かに低下し、それぞれ 16mm ($\epsilon=8\%$) 及び 20mm ($\epsilon=7\%$) の沈み込み変形が生じている。 Q_h が Q_{up} を超えたため引張り変形が生じたが、積層ゴム直径に対して比較的大きな水平変形が生じたため沈み込み変形も生じた。すなわち、運動パターンは混在型に分類される。終局入力レベルの解析では、終局直前レベルで引張り変形が生じた部分において引張り力が降伏応力を超えたため解析不能となった。

23F 修正モデル：正側水平変形時に免震層水平力が Q_{up} を超え積層ゴム A に 8mm 程度の引張り変形が生じている。積層ゴムの 3 列配置とすることにより、2 列配置の 23F モデルと比較して Q_{up} が 2/3 となるため、小さい入力レベルで引張り変形が生じた。最大水平変形は 0.75m ($\gamma=310\%$) であり、積層ゴムの直径に相当する変形 (1.2m) に対して 60%程度となっている。このため、積層ゴムの水平力は、除荷時ループに膨らみが見られるものの概ね線形であり、積層ゴム B の正側最大変形時における沈み込み変形も 12mm ($\epsilon=5\%$) 程度と他モデルに比べて小さい。すなわち、運動パターンは浮き上がり型に分類される。

本手法は、積層ゴムの座屈破壊に着目した手法であるため、積層ゴムに引張り変形が生じたケースについては、最終的な引張り破断を判定することができない。しかし、2.5.10 節でも述べたように、積層ゴムのスケール効果を考慮すれば、実大規模の建物

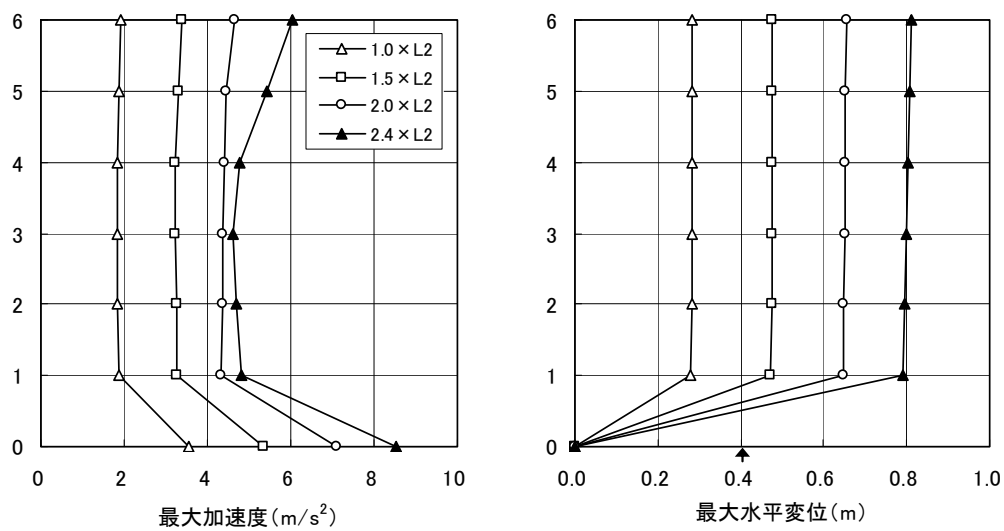
を想定した場合の引張りに対する終局入力レベルは、引張り変形が生じたレベルを大きく超えるものではないと考えられる。すなわち、本手法から得られた結果は、引張り破断による終局挙動に対しても妥当な評価を与えることが分かる。

表 6.6 各モデルの終局入力レベル

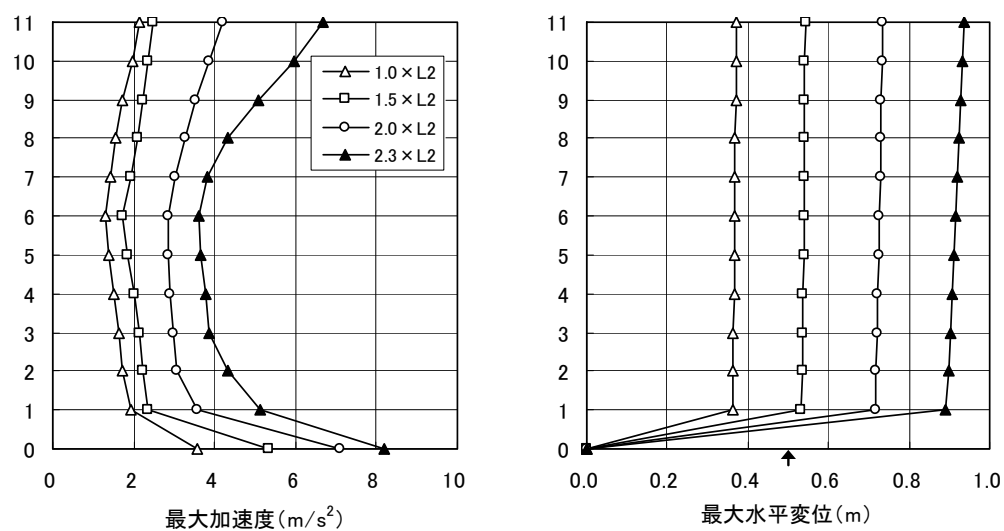
モデル名	5F	10F	15F	23F	23F 修正
入力レベル ($\times L2$)	2.5	2.4	2.5	2.7	2.0

表 6.7 各モデルの 1 構面あたりの静的浮き上がり限界水平力 Q_{up}

モデル名	5F	10F	15F	23F	23F 修正
総重量 (kN)	41738	79605	123186	240394	240394
1 構面重量 (kN)	5963	11372	17598	34342	34342
塔状比 H/B	1.25	2.5	3.75	4.88	4.88
Q_{up} (kN)	4770	4549	4693	7037	4692

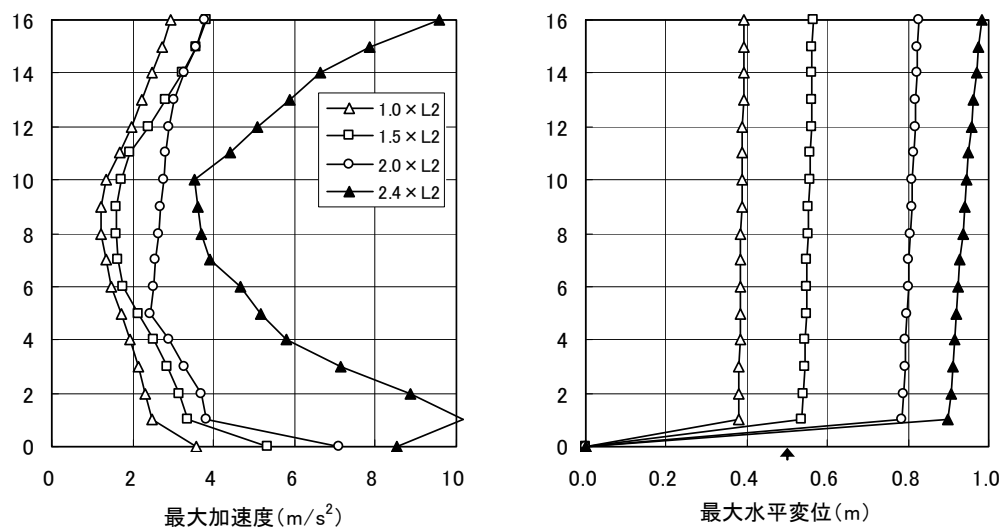


5F モデル

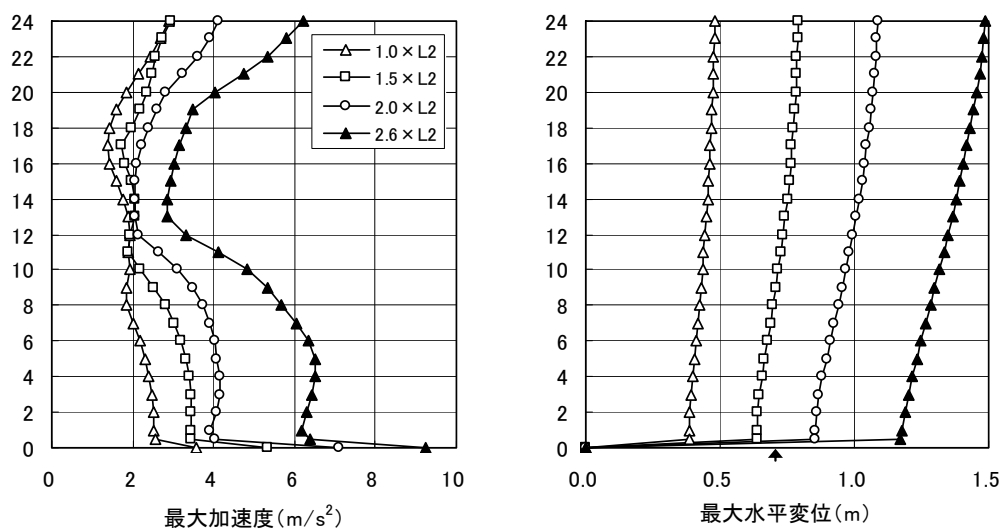


10F モデル

図 6.8 最大加速度と最大水平変位の高さ方向の分布（終局直前レベルまで）

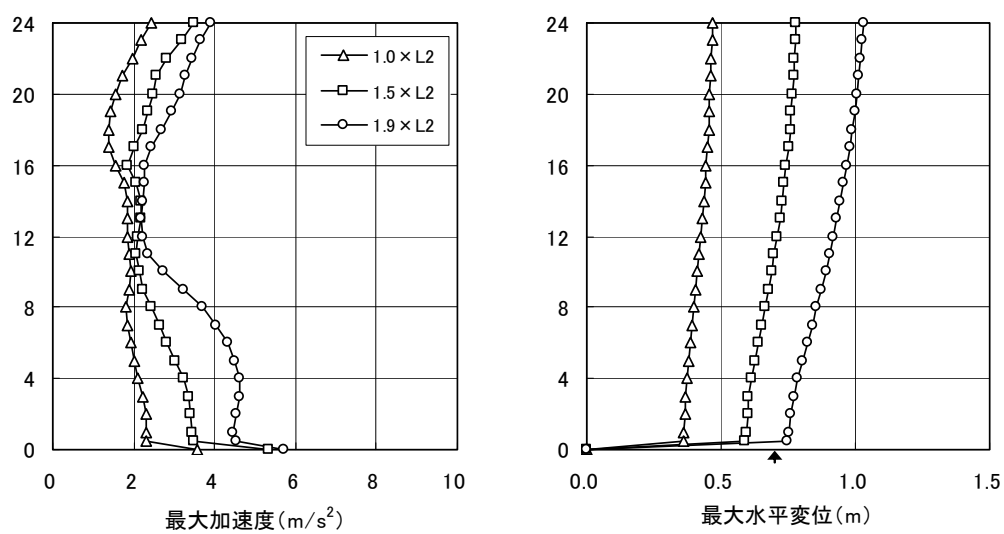


15F モデル



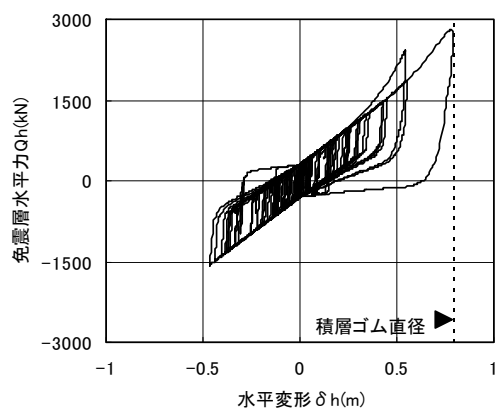
23F モデル

図 6.9 最大加速度と最大水平変位の高さ方向の分布（終局直前レベルまで）

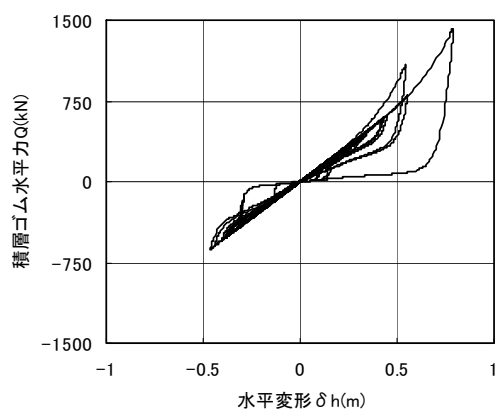


23F 修正モデル

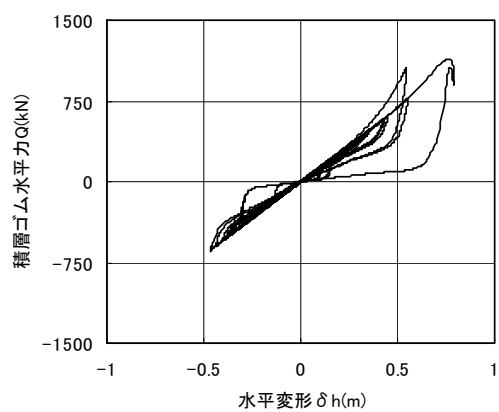
図 6.10 最大加速度と最大水平変位の高さ方向の分布（終局直前レベルまで）



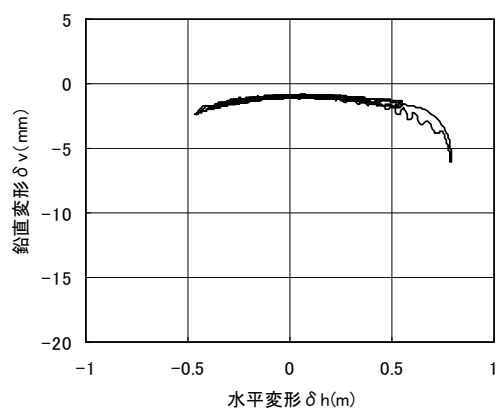
免震層全体



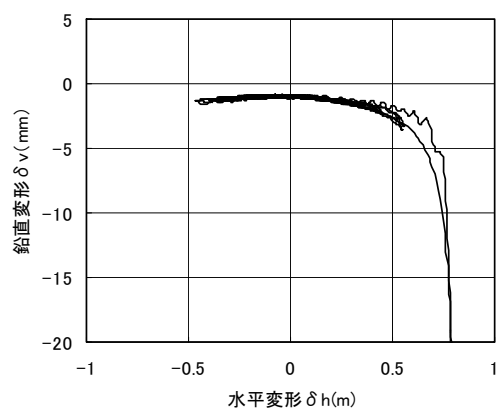
積層ゴム A



積層ゴム B

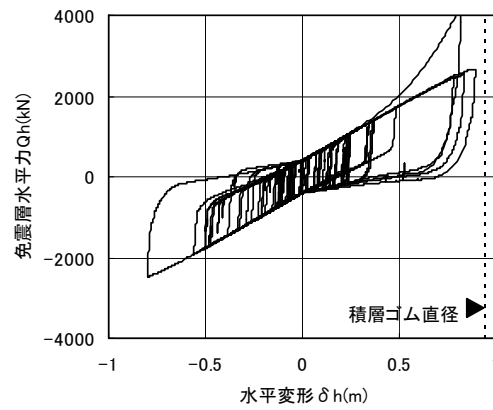


積層ゴム A

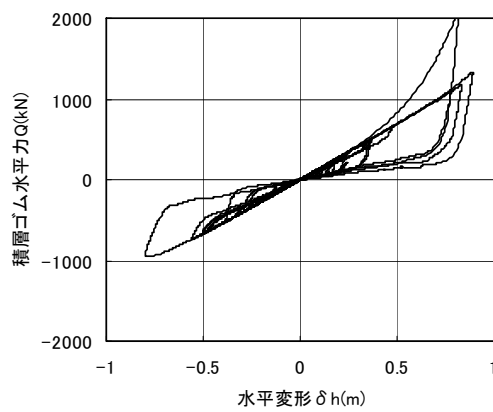


積層ゴム B

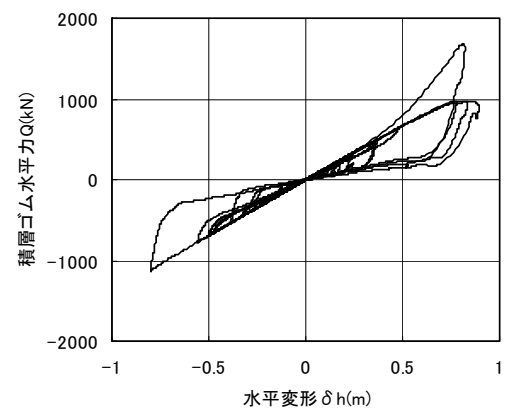
図 6.11 終局直前レベルにおける積層ゴムの挙動 (5F モデル、 $2.4 \times L2$)



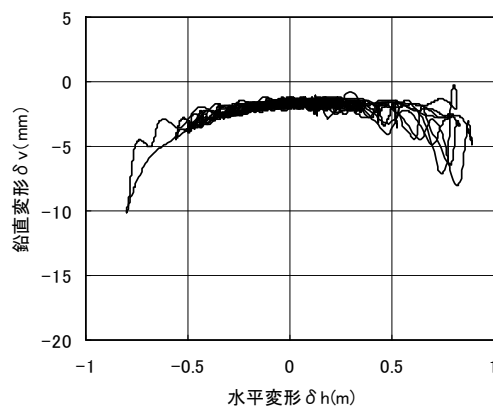
免震層全体



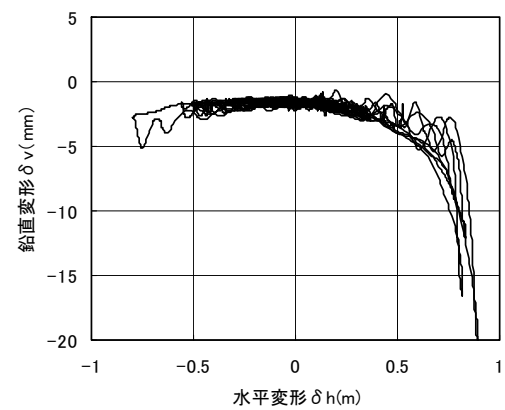
積層ゴム A



積層ゴム B

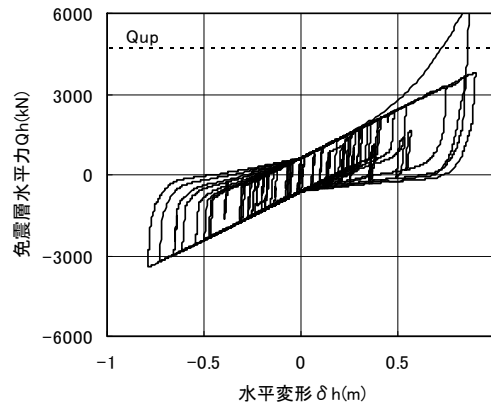


積層ゴム A

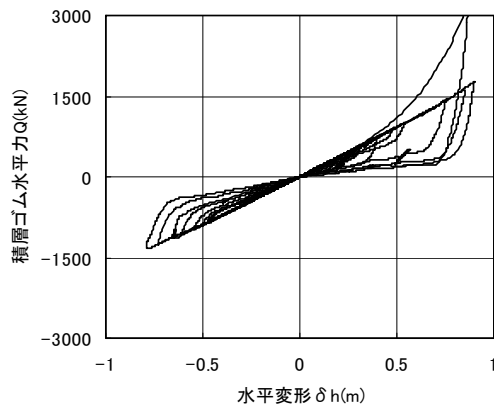


積層ゴム B

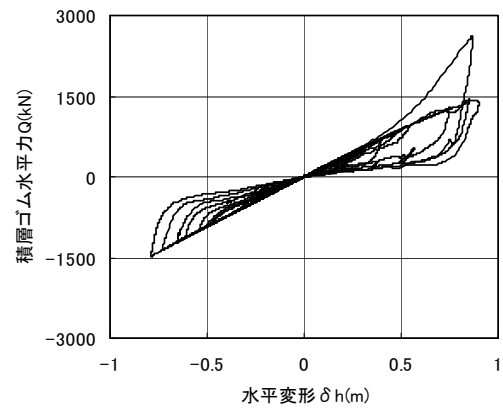
図 6.12 終局直前レベルにおける積層ゴムの挙動 (10F モデル、 $2.3 \times L2$)



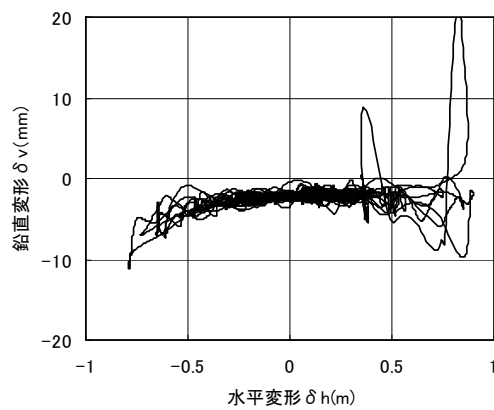
免震層全体



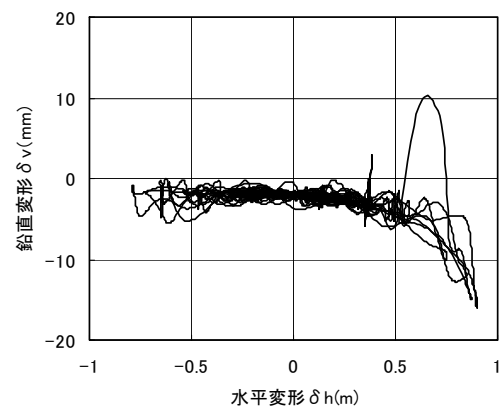
積層ゴム A



積層ゴム B

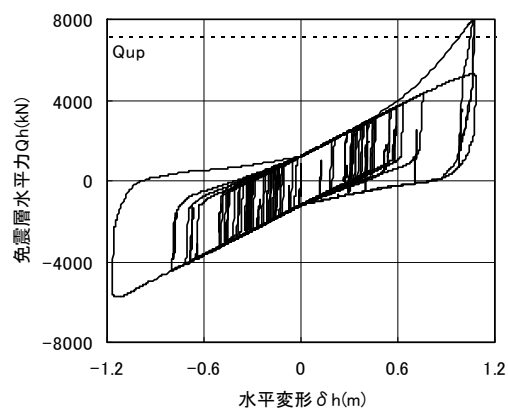


積層ゴム A

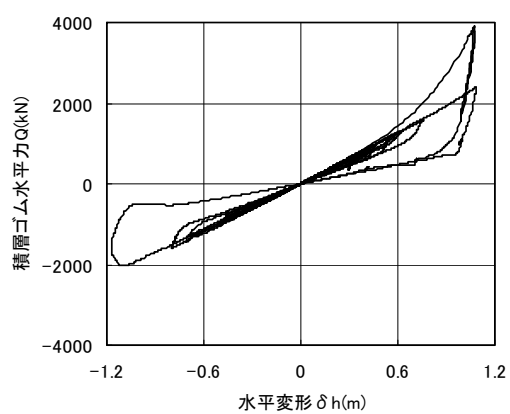


積層ゴム B

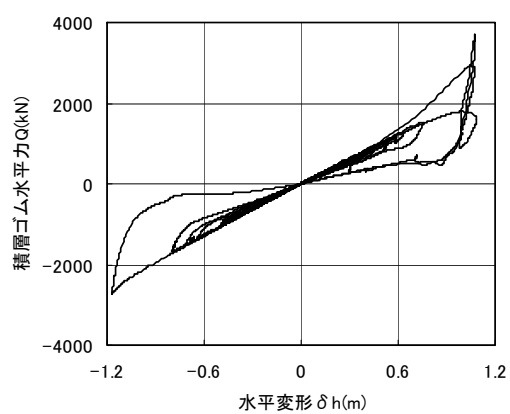
図 6.13 終局直前レベルにおける積層ゴムの挙動 (15F モデル、 $2.4 \times L2$)



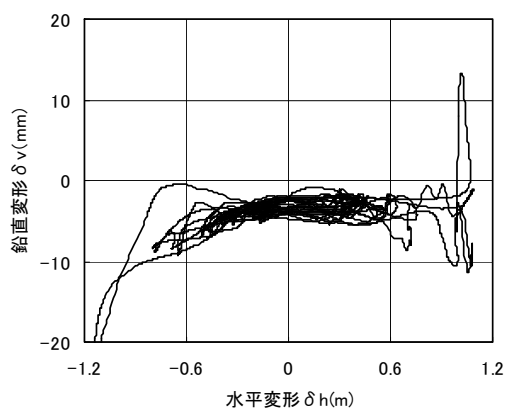
免震層全体



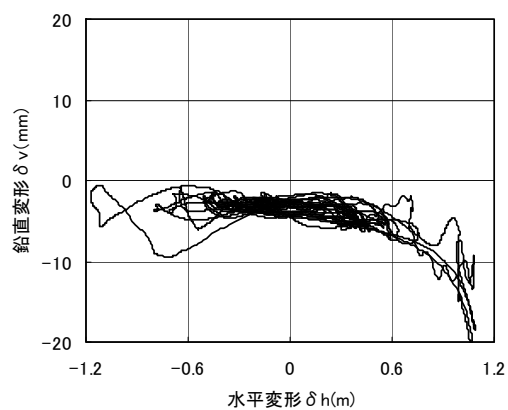
積層ゴム A



積層ゴム B

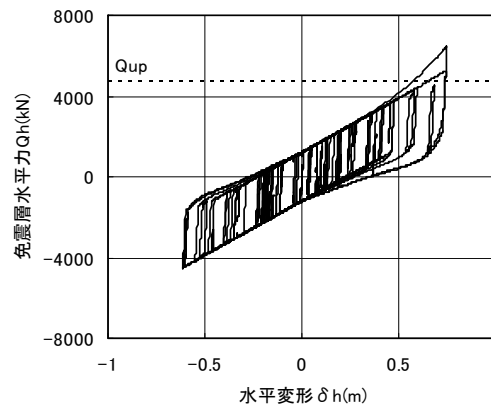


積層ゴム A

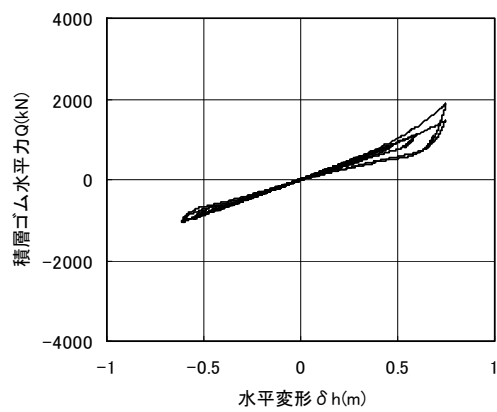


積層ゴム B

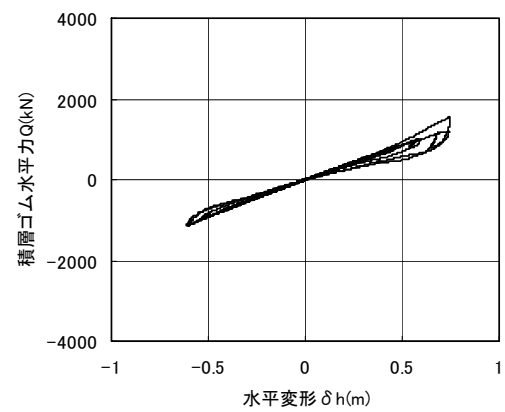
図 6.14 終局直前レベルにおける積層ゴムの挙動 (23F モデル、 $2.6 \times L2$)



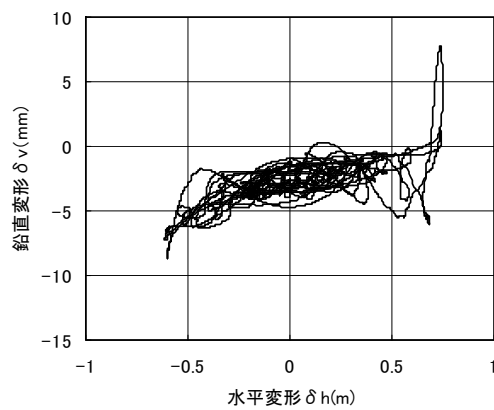
免震層全体



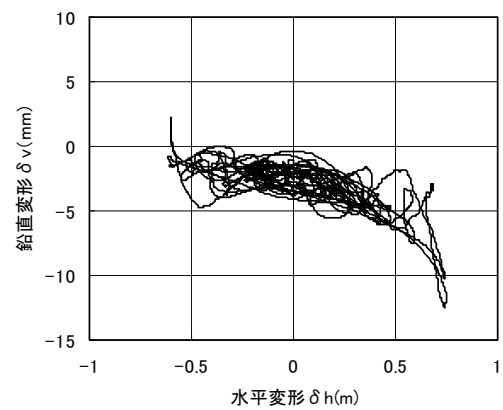
積層ゴム A



積層ゴム B



積層ゴム A



積層ゴム B

図 6.15 終局直前レベルにおける積層ゴムの挙動 (23F 修正モデル、 $1.9 \times L2$)

6.5.3 長周期地震動に対する応答特性

長周期地震動に対する応答特性を確認するため、水平 1 方向入力の影響解析を行った。入力波としては三の丸波を用い、入力レベルは原波の最大加速度を規準として 0.25 倍、0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍と振幅を増加させた。以下では入力レベルを「倍率×SAN」と表記する。解析対象は 23F モデルとした。図 6.16 に各入力レベルの最大水平加速度、最大水平変位の高さ方向の分布を示す。これより、最大加速度に着目すると、0.25×SAN 及び 0.5×SAN では、入力に対して免震層の直上も含めて上部構造の応答が増幅されている。これは建物周期が入力波に対して共振的な状態になったためと推察される。一方、1.0×SAN 以上では、高次振動成分の励起により上層部の応答増幅が顕著になるが、入力加速度に対して上部構造の応答が小さくなった。また、入力レベルの増大に伴い低減効果も増している。これについては、免震層水平変形の増大に伴い免震層の等価周期が大きくなり、入力波との共振状態から抜け出したためと考えられる。

一般的に、免震層の水平特性はバイリニア型で表される復元力特性を有しており、水平変形に応じて等価な周期が変動する。よって、長周期地震動のように免震建物の固有周期付近の成分が卓越する地震動を受けた場合でも、共振するか否かは地震動の入力レベルに依存する。また、共振した場合でも、免震構造では 15% 程度の比較的大きな減衰を有しているため、応答が極端に増幅されることはないと考えられる。

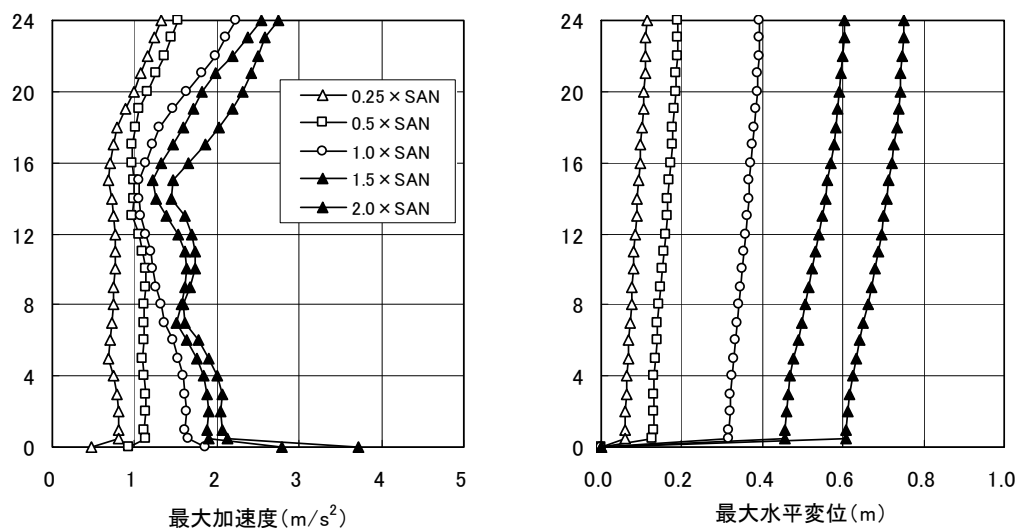


図 6.16 最大加速度と最大水平変位の高さ方向の分布
(長周期地震動に対する応答、23F モデル)

6.5.4 上下動入力の影響

上下動入力がある終局挙動に及ぼす影響を把握するため、水平・上下 2 方向入力の応答解析（上下動考慮）を行なった。入力波としては EL CENTRO 波及び JMA KOBE 波を用い、大入力時の運動パターンが沈み込み型に分類された 10F モデルと混在型に分類された 15F モデルを対象として、積層ゴムに引張り変形が生じるレベルまでの解析を行った。入力レベルは、水平方向については原波の加速度を規準として 1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍と増加させ、2.0 倍以降は 0.1 倍刻みで終局状態まで振幅を増幅させた。以下では入力レベルを「倍率×EL」又は「倍率×KOBE」と表記する。上下方向は水平方向のレベルに寄らず一定とした。JMA KOBE 波は原波（最大加速度：3.33m/s²）をそのまま用い、EL CENTRO 波は、10F モデルでは水平動を 0.5m/s に規準化した際と同じ比率で原波を規準化した波形（最大加速度：3.08m/s²）を、15F モデルでは原波（最大加速度：2.06m/s²）をそれぞれ用いた。15F モデルで規準化波形を用いなかった理由については、15F モデルで規準化波形による解析を実施したところ、1.0×EL で引張り変形が生じて解析不能となったためである。また、比較のために、上下動を入力しない水平 1 方向入力の応答解析（上下動未考慮）も実施した。

表 6.8 に、解析結果から得られた上下動考慮と上下動未考慮による終局入力レベルを比較して示す。これより、上下動考慮の終局入力レベルは上下動未考慮のそれよりも小さくなっている。これは、上下動考慮ではより小さな入力レベルにおいて積層ゴムに引張り変形が生じるためである。

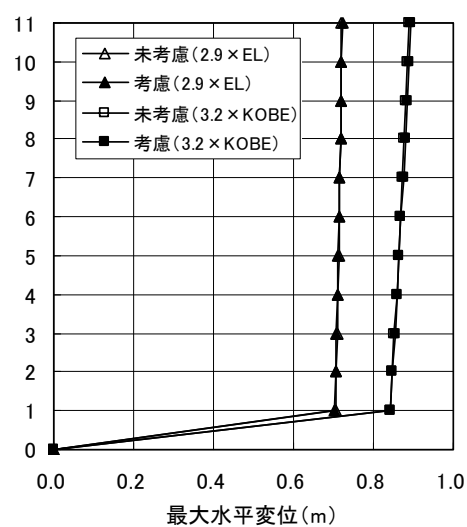
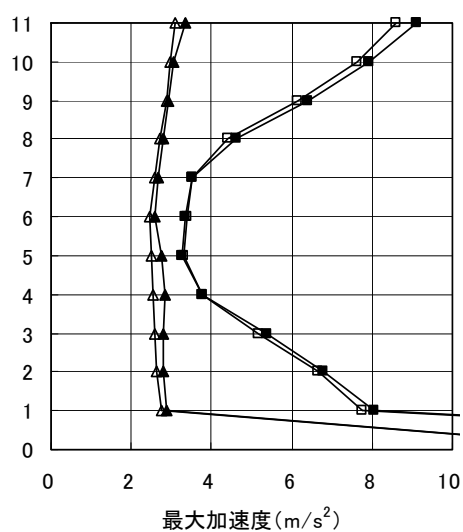
図 6.17 に、各入力波の上下動考慮と上下動未考慮について、最大水平加速度、最大水平変位の高さ方向の分布を示す。入力レベルは図中に示しているように、上下動考慮の終局レベルの 0.1 倍の直前レベルである。これより、上下動を考慮することによって上下動未考慮と比較して水平加速度が大きくなる傾向が見られる。この傾向は上階及び下階ほど顕著になるが最大でも 5%程度である。一方、水平変形には両者の違いがほとんど認められない。

図 6.18、6.19 に、EL CENTRO 波入力の上下動考慮と上下動未考慮について、積層ゴムの水平力（ Q ）－水平変形（ δh ）曲線、鉛直荷重（ P ）－ δh 曲線、鉛直変形 δv － δh 曲線を示す。入力レベルは同じく上下動考慮の終局レベルの直前レベルである。 P － δh 曲線より、上下動考慮では上下動未考慮と比較して鉛直荷重の変動が大きくなり変動の周期も短くなっている。また、 δv － δh 曲線より、上下動考慮では鉛直荷重変動の影響により沈み込み変形が増大し、一部で引張り変形が生じている。一方、 Q － δh 曲線より、積層ゴム水平力については、大変形時に僅かな変動が認められるものの、鉛直荷重変動の影響はほとんど現れていない。

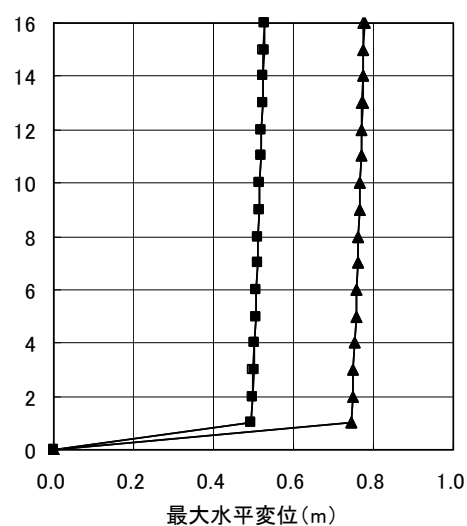
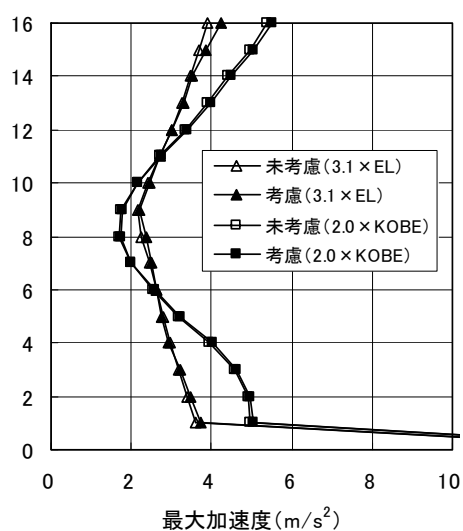
以上より、大入力時の運動パターンによらず、上下動入力を考慮することによって、考慮しない場合と比較して小さい入力レベルで引張り変形が生じ、終局入力レベルが小さくなった。一方、上下動入力が積層ゴムの水平復元力特性に与える影響は小さく、上部構造の水平方向の応答特性にはほとんど影響を与えないことが確認された。

表 6.8 上下動を考慮した場合の終局入力レベル

モデル名	10F モデル		15F モデル	
	EL CENTRO	JMA KOBE	EL CENTRO	JMA KOBE
入力地震動				
上下動考慮	$3.0 \times \text{EL}$	$3.3 \times \text{KO}$	$3.2 \times \text{EL}$	$2.1 \times \text{KO}$
上下動未考慮	$3.6 \times \text{EL}$	$3.4 \times \text{KO}$	$3.9 \times \text{EL}$	$2.8 \times \text{KO}$

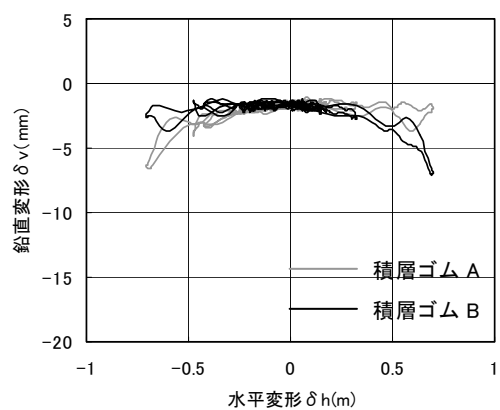
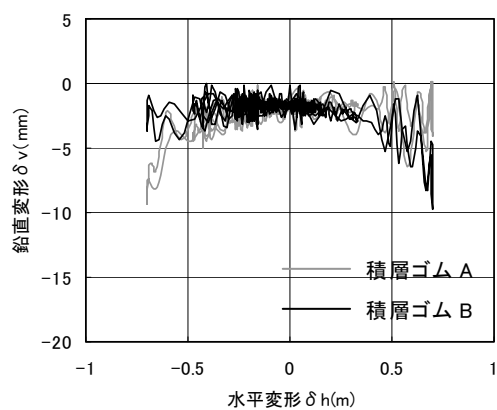
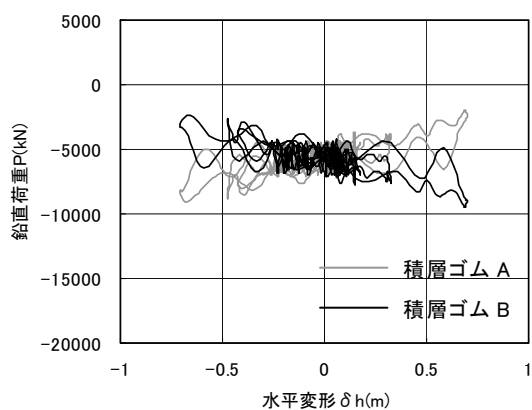
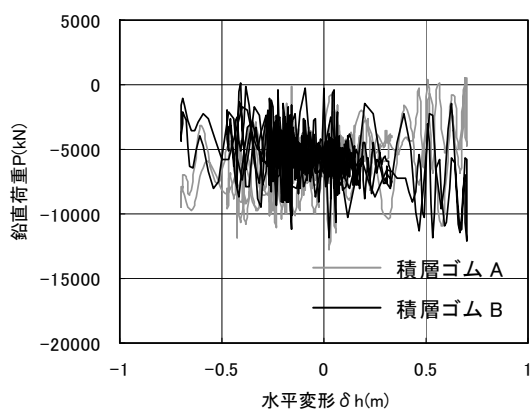
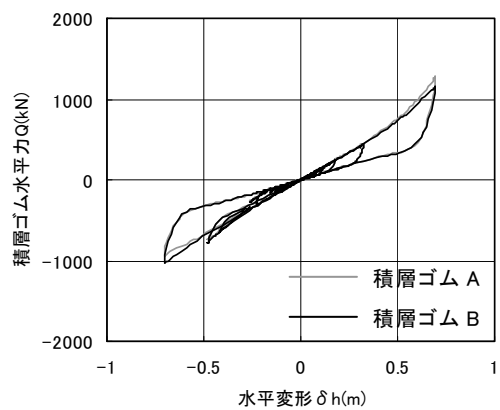
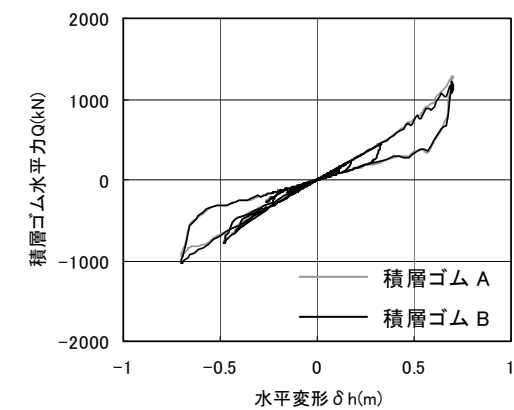


10F モデル



15F モデル

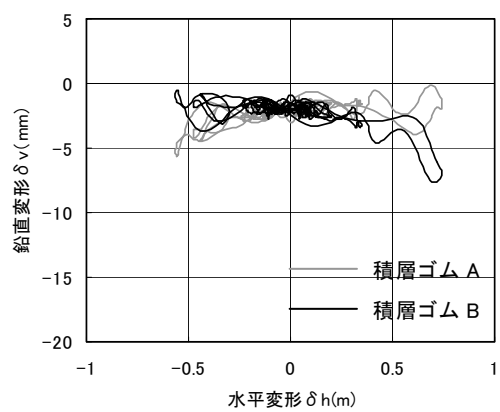
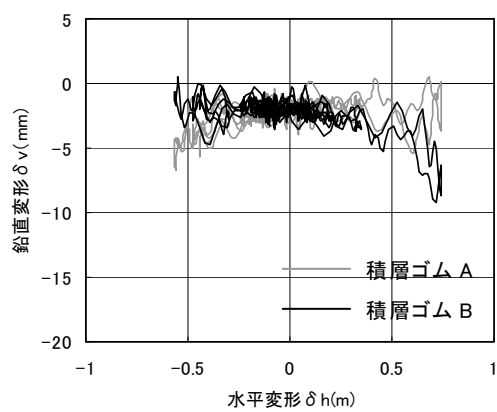
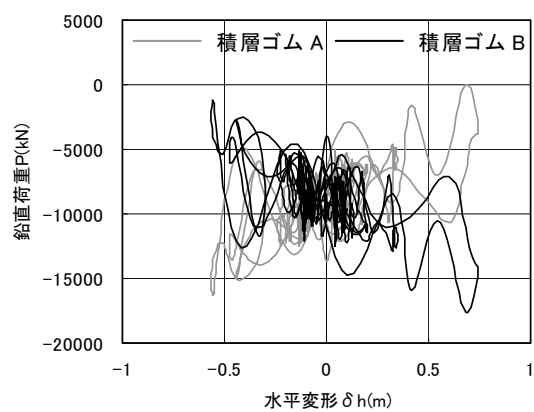
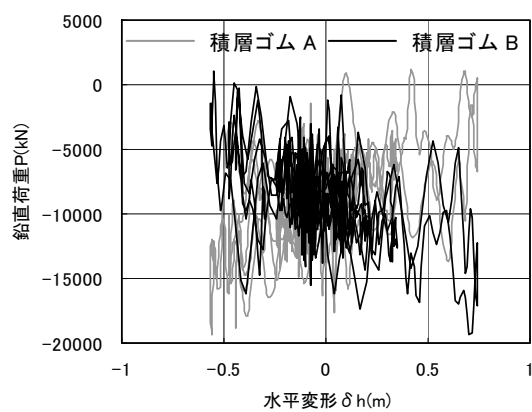
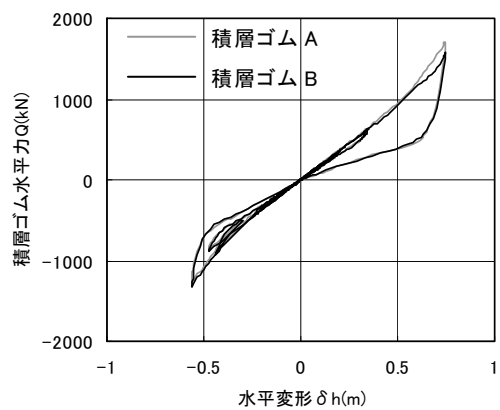
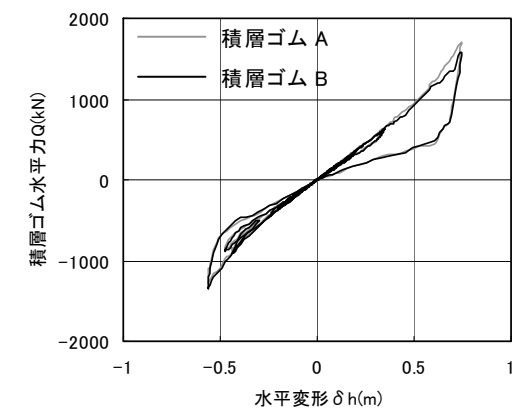
図 6.17 最大加速度と最大水平変位の高さ方向の分布（上下動入力の影響）



上下動考慮

上下動未考慮

図 6.18 終局直前レベルにおける積層ゴムの挙動 (10F モデル、 $2.9 \times EL$)



上下動考慮

上下動未考慮

図 6.19 終局直前レベルにおける積層ゴムの挙動 (15F モデル、 $3.1 \times EL$)

6.6 まとめ

実際の免震建物が極限的な地震動を受けた時の終局挙動を把握するため、第5章で提示された終局挙動解析法を用いた免震建物の地震応答解析を実施した。解析では、建物階数が5階、10階、15階、23階、塔状比が1.25～4.88の免震建物モデルを設定し、入力地震動として、EL CENTRO-NS波、HACHINOHE-NS波、JMA KOBE-NS波、BCJ-L2波、三の丸波を用い、各種要因が終局挙動に与える影響について検討した。本章より得られた知見を以下に示す。

- (1) 設計レベルを想定した上記5波による地震応答解析を実施した。このうち、長周期地震動を想定した三の丸波入力時には、全モデルで入力に対して上部構造の加速度応答が増幅され、免震周期が5秒を越える23階モデルを除き、免震層の最大水平変形が最大となった。一方、積層ゴムの最大せん断ひずみは225%以下であり、積層ゴムの水平特性はほぼ線形の範囲であった。通常想定される地震動の範囲においては、修正マクロモデルは従来の線形モデルとほぼ同様の特性を示した。
- (2) BCJ-L2波の振幅拡張波を用いた終局挙動解析を実施した。一般の免震建物を想定した場合でも、本解析法によって、積層ゴムに引張り変形や座屈的な挙動が生じるまでの終局挙動を概ね追跡することができた。座屈破壊については、水平変形が直径相当の変形を超え、沈み込み変形が現実的な値を超えることによって判定が可能である。終局時の運動パターンは、塔状比1.25、2.5の5階、10階のモデルでは沈み込み型に、塔状比3.75、4.88の15階、23階のモデルでは混在型となった。免震層の水平力は、前者では常に剛体の静的浮き上がり限界水平力 Q_{up} 以下に、後者では Q_{up} を超えている部分が認められた。塔状比が大きくなるほど Q_{up} が小さくなるため浮き上がりが生じやすくなるが、浮き上がりが生じるか否かは免震層水平力との大小関係に依存する。すなわち、上部構造を剛体とした振動台実験から得られた浮き上がりの条件は、実免震建物にも当てはまることが確認された。
- (3) 三の丸波の振幅拡張波を用いて長周期地震動に対する23Fモデルの応答特性を確認した。入力倍率が1.0より小さいと上部構造の応答は入力加速度よりも大きくなったが、入力倍率1.0以上では、入力加速度に対して上部構造の応答が小さくなった。免震建物の固有周期付近の成分が卓越する長周期地震動を受けた場合でも、共振するか否かは地震動の入力レベルに依存する。共振した場合でも、免震構造では15%程度の比較的大きな減衰を有しているため、応答が極端に増幅されることはないと考えられる。
- (4) 運動パターンが沈み込み型に分類された10Fモデルと混在型に分類された15Fモ

デルを対象として、EL CENTRO 波及び JMA KOBE 波による水平・上下 2 方向入力の応答解析を行い、上下動入力が終局挙動に及ぼす影響を把握した。これより、大入力時の運動パターンによらず、上下動入力を考慮することにより、考慮しない場合と比較して小さい入力レベルで引張り変形が生じて終局状態となること、上下動入力が積層ゴムの水平復元力特性に与える影響は小さく、上部構造の水平方向の応答特性にはほとんど影響を与えないことが確認された。

第 6 章参考文献

- 6.1) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、2007.
- 6.2) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の応答制御技術研究委員会報告書・論文集、2002.6.
- 6.3) (社)日本免震構造協会：免震部材標準品リスト、2005.
- 6.4) 国土交通省中部地方整備局ほかコンソーシウム：名古屋市三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成（概要版）、p.48、2004.
- 6.5) 多田英之、高山峯夫他：4 秒免震への道－免震構造設計マニュアル－、pp.31-32、理工図書、1997.

第7章 結論

1980年代に実用化された積層ゴムを用いた免震構造は、固有周期の短い建物を長周期化させる技術であり、建物高さが60m以下の中低層建物を中心に適用が進められてきた。しかし、1995年の兵庫県南部地震において、免震構造の地震に対する応答低減効果を実証されたことを契機として、その有効性が広く認知されることとなった。それ以降は、免震構造の適用範囲が拡大され、塔状比の大きい高層建物にも適用されるようになった。一方、現状の設計が有する安全余裕度を評価するためには、限界状態における終局挙動を定量的に把握することが重要な課題となる。塔状比の大きい高層免震建物では地震時にロッキング振動が生じやすく、隅角部の積層ゴムには引張り力が生じる可能性が高く、上部構造の浮き上がりに伴い積層ゴムが引張り破断する状態が終局状態として想定される。さらに、上部構造の並進的な運動に伴う積層ゴムの座屈破壊が混在する場合なども想定され、非常に複雑な終局挙動を呈することが予想される。免震建物の終局挙動の把握を目的として、いくつかの振動台実験が行なわれている。しかし、上部構造として塔状比の小さい原子炉建屋を想定した一連の研究を除けば、積層ゴムの破壊までの終局挙動の把握を試みた実験は行われておらず、免震建物の終局挙動は未解明の分野である。また、免震建物の終局挙動を時刻歴応答解析により予測する場合、積層ゴムのモデル化が重要な課題となるが、圧縮荷重を受ける積層ゴムの大変形域における複雑な復元力特性を精度よく表現する力学モデルは提案されておらず、積層ゴムの座屈破壊が生じる場合の終局挙動について地震応答解析を試みた例は見られない。

以上の背景の下、本論では、積層ゴムで支持された免震建物が、現状の設計で想定されている入力レベルを大きく超える地震動入力を受けた場合の終局挙動を解明することを目的とした。ここでいう終局挙動とは、過大な入力によって上部構造にロッキング的な挙動が現れ、積層ゴムに過大な圧縮荷重あるいは引張り荷重が生じるとともに、その直径に相当するような水平変形が生じ、最終的に積層ゴムに座屈破壊あるいは引張り破断が生じる状態を示す。免震建物の終局挙動を解明していくに際し、本論では振動台実験と終局挙動解析法という大きく2つのテーマに分けて議論を展開した。前者は、積層ゴムで支持した縮小免震建物模型を対象とした振動台実験についてであり、第2章において述べられている。実験要因として上部構造の塔状比と積層ゴムの形状・面圧を採用し、塔状比は4及び6の2ケース、積層ゴムの形状・面圧は、小径・高面圧と大径・低面圧の2ケースを設定した。積層ゴムは、減衰機能を併せ持った鉛

プラグ入り積層ゴム (LRB) 及び高減衰積層ゴム (HDB) を用いた。これらを組み合わせ、6 ケースについて、BCJ-L2 波の振幅拡張波の水平 1 方向入力により積層ゴムが破壊に至るまで加振した。実験結果より、各要因が終局挙動に与える影響並びに終局時における上部構造や積層ゴムの挙動について詳細に分析した。一方、後者は第 3 章から第 6 章にわたって記述されており、過大な水平変形下で積層ゴムに座屈破壊が生じる場合の終局挙動に着目したものである。第 3 章では、積層ゴムの力学モデルである修正マクロモデルを提案し、モデルの精度を確認するために積層ゴム単体実験の数値解析を実施した。第 4 章では、修正マクロモデルのせん断ばね特性として適用するため、積層ゴムの大变形の履歴性状をできるだけ忠実に模擬する履歴則を考案した。さらに、第 5 章では修正マクロモデルを採り入れた終局挙動解析法を提示し、振動台実験のうち、過大な水平変形下で積層ゴムに座屈破壊が生じた実験ケースを対象とした数値解析を実施し、本解析法の有効性を検証した。第 6 章では、実際の免震建物が極限的な地震動を受けた時の終局挙動を把握するため、提案された終局挙動解析法を用いた免震建物の地震応答解析を実施した。解析では、いくつかの代表的な免震建物モデルを設定し、建物高さ、積層ゴムの配置、入力地震動等の要因が終局挙動に与える影響について検討した。本論から得られた主な知見は以下のとおりである。

実験要因が終局挙動に与える影響

大入力時における運動パターンは、重錘の並進的な運動により両方の積層ゴムに沈み込み変形が生じ、重錘全体が沈み込む「沈み込み型」、重錘のロッキング的な運動により積層ゴムに引張り変形が生じ、重錘が浮き上がる「浮き上がり型」、積層ゴムの沈み込み変形と引張り変形が同時に生じる「混在型」に分類された。これらの運動パターンは、塔状比 (H/B) によって定まる剛体の静的浮き上がり限界水平力 Q_{up} ($=W/(H/B)$) と積層ゴムの形状・面圧に関する免震層水平力 Q_h の大小関係に支配されており、 $Q_{up} < Q_h$ の場合には基本的に浮き上がり型となり、 $Q_{up} > Q_h$ の場合には沈み込み型となった。一方、沈み込み変形は免震層水平変形が積層ゴムの直径に相当する変形に近づくほど増加するため、 $Q_{up} < Q_h$ で引張り変形が生じていても、水平変形が直径相当の変形に近づくると沈み込み変形が増加し、混在型に分類された。

大入力時及び終局時の挙動

大入力時における積層ゴムの水平力－水平変形曲線及び鉛直荷重－鉛直変形曲線は沈み込み型と浮き上がり型で大きく異なっていた。浮き上がり型では、水平力は水平変形だけに、鉛直変形は鉛直荷重だけに専ら依存する単純な性状を示すが、沈み込

み型では、水平力が水平変形だけでなく鉛直荷重にも、鉛直変形が鉛直荷重だけでなく水平変形にも強く影響され、複雑な挙動を示した。

沈み込み型では、最終的に水平変形が直径相当の変形を超え、積層ゴムが座屈破壊した。浮き上がり型では、積層ゴムに大きな引張り変形が生じ最終的に積層ゴムが引張り破断した。沈み込み型及び浮き上がり型について、積層ゴムが破壊した時の終局挙動を総括すると以下の通りである。

沈み込み型：直径相当の変形を超える水平変形下において、過大な圧縮荷重を受ける側の積層ゴムの水平力が大きく低下し、その直後に生じた重錘のロッキング的な運動に伴う荷重変動によりもう一方の積層ゴムの水平力も低下した。最終的には、免震層全体として復元力が失われ、重錘の並進的な運動に伴い両積層ゴムにほぼ同時に座屈破壊が生じた。

浮き上がり型：免震層水平力が Q_{up} を超えたことをきっかけとして、一方の積層ゴスを支点として他方が浮き上がり、積層ゴムに引張り破断が生じた。また、塔状比が大きくなると水平変形が小さい領域で引張り変形が生じやすくなるため、破断時の引張り変形は大きくなった。このことは、塔状比が大きくなっても、積層ゴムが引張り破断する入力レベルが著しく低下することではなく、破断までの余裕を有していることを示唆している。

圧縮荷重を受ける積層ゴムの大变形挙動を表す力学モデル

圧縮荷重を受ける積層ゴムの終局挙動を表現できるモデルとして、Koh-Kelly のモデルに幾何学的非線形と材料非線形を導入して拡張された大变形マクロモデルが提案されている。大变形マクロモデルはせん断ばね、回転ばね、剛体要素によって積層ゴムを表現したモデルであるが、本論では、地震応答解析への適用を目的とし、新たに非線形の軸ばねを追加した修正マクロモデルを考案した。また、このモデルの精度を確認するために、積層ゴム単体の実験の数値解析を実施した。実験は、直径 200mm、せん断弾性係数 0.392MPa の天然ゴム系積層ゴム縮小試験体を用いて、一定荷重下及び変動荷重下で水平方向に単調載荷を与えた。解析結果と実験結果の比較より、一定荷重下の大変形域において、水平力が頭打ちとなり負勾配が発生する挙動並びに鉛直変形の沈み込み変形が増大する挙動が高精度に再現できた。また、変動荷重に伴う水平力と鉛直変形の変動も正確に表現できた。本解析では、モデルを構成する 3 つのばねの非線形特性に関するパラメータを、実験結果に基づき与える必要がある。しかし、一組のパラメータによって全ての実験ケースが精度良く再現されたことを考慮すれば、積層ゴスを 3 つのばねと剛体要素で表した本モデルの基本的な考え方並びに各ばねの

非線形特性を規定する関数形状の設定は、それぞれ妥当である。

積層ゴムの大変形せん断履歴則

修正マクロモデルのせん断ばね特性に適用することを想定し、単純な曲線式で構成された天然ゴム系積層ゴムの大変形せん断履歴則を考案した。本履歴則は、大変形域におけるハードニングと除荷時の履歴ループの膨らみ及び大変形経験後の繰り返しの剛性低下が考慮できるものである。本履歴則の精度と汎用性を検討するために、2種類のゴム材料の積層ゴムの大変形加力実験の数値解析を実施した。実験では、試験体として直径 200mm、せん断弾性係数 0.392MPa 及び 0.578MPa の天然ゴム系積層ゴム縮小試験体を用いて、圧縮荷重一定下で水平方向に繰り返し漸増载荷を行った。解析結果と実験結果の比較より以下のことが確認された。

圧縮荷重が 0 の場合：本履歴則を直接用いた履歴曲線形状が実験で得られた曲線の特徴を良く表現できる。また、ゴム材料が異なってもパラメータに適切な値を設定することで解析と実験を合致させることができる。

圧縮荷重を与えた場合：本履歴則を修正マクロモデルのせん断ばね特性に適用した。これより、積層ゴムの大変形域における水平復元力の低下や鉛直沈み込み変形の繰り返し性状をよく表現し得る。

以上より、本履歴則は精度が高く、扱いやすさの点からも十分に実用的であると考えられる。

積層ゴムで支持した免震建物の終局挙動解析法

過大な水平変形下において、積層ゴムに座屈破壊が生じる終局挙動を予測できる時刻歴応答解析法を提案した。提案された終局挙動解析法を要約すると以下の通りとなる。積層ゴムの水平特性及び鉛直特性を修正マクロモデルによって表し、修正マクロモデルのせん断ばねの特性として大変形せん断履歴則を採用した。運動方程式を解く数値積分法としては、修正マクロモデルでは剛性のフィードバックが難しいため、復元力を直接フィードバックできる中央差分法（衝撃加速度法）を用いた。振動台実験の数値解析並びに修正マクロモデルを考慮しない従来一般に採用されている終局地震応答解析法（従来手法）との比較を行い、解析手法の妥当性及び有効性を検討した。

振動台実験の数値解析：大変形下において、過大な鉛直荷重が生じる積層ゴムにおける水平力の低下と負勾配の発生及び沈み込み変形の増大、鉛直荷重が低下する積層ゴムにおける水平力のハードニング等の非線形挙動を模擬することができた。

従来手法との比較：従来手法による解析では、本来積層ゴムに沈み込み変形が生じる

部分において引張り変形が生じる結果となり、積層ゴムの座屈破壊で終局となるケースを、引張り破断で終局となる正反対の結果として評価してしまう可能性がある。建物設計において重要な安全余裕度を把握するためには、終局挙動の定量的な評価が必須であり、その意味で、従来手法はその要求に対応することができない。積層ゴムの座屈破壊で終局となる場合、本手法が有効である。

免震建物の終局地震応答解析

解析対象の建物として、階数が 5 階、10 階、15 階、23 階、塔状比が 1.25～4.88 の免震建物モデルを設定し、BCJ-L2 波の振幅拡張波を用いた終局挙動解析を実施した。本解析法によって、一般の免震建物を対象とした場合でも、積層ゴムに引張り変形や座屈的な挙動が生じるまでの終局挙動を概ね追跡することができた。座屈破壊については、水平変形が直径相当の変形を超え、沈み込み変形が現実的な値を超えることによって判定が可能である。終局時の運動パターンは、塔状比 1.25、2.5 の 5 階、10 階のモデルでは沈み込み型に、塔状比 3.75、4.88 の 15 階、23 階のモデルでは混在型となった。免震層の水平力は、前者では常に剛体の静的浮き上がり限界水平力 Q_{up} 以下に、後者では Q_{up} を超えている部分が認められた。塔状比が大きくなるほど Q_{up} が小さくなるため浮き上がりが生じやすくなるが、浮き上がりが生じるか否かは免震層水平力との大小関係に依存する。すなわち、上部構造を剛体とした振動台実験から得られた浮き上がりの条件は、実免震建物にも当てはまることが確認された。

謝 辞

本論文は、筆者が鹿島建設（株）技術研究所において今日までに研究した成果をまとめたものです。

本論文をまとめるに際しては、京都大学教授中島正愛博士から終始にわたり懇切丁寧なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。また、本論文の審査に当たり、ご指導を賜りました京都大学教授河井宏允博士、同教授竹脇出博士、同教授井上一朗博士、同教授川瀬博博士に厚くお礼申し上げます。

本研究を遂行するに際しては、多くの方々にご支援、ご協力を頂きました。

元鹿島建設（株）技術研究所の故飯塚真巨氏には、本研究の全般について多大なご指導を賜りました。氏からは、筆者が鹿島建設（株）技術研究所に入社して以来、公私にわたり終始変わらぬご指導、激励を頂きました。心から感謝申し上げます。また、鹿島建設（株）小堀研究室の竹中康雄氏には、振動台実験と終局挙動解析法の開発について多大なご指導とご助言を頂きました。元鹿島建設（株）ITソリューション部の故吉川和秀博士には、数値解析プログラムの開発に多くのご助言とご協力を頂きました。鹿島建設（株）技術研究所の二村有則氏には、振動台実験の遂行と実験結果の分析について多大なご尽力を頂きました。本論文の一部となっている振動台実験は、これらの4氏と共同で実施したものです。各位に心からの謝意を表します。

鹿島建設（株）技術研究所長戸河里敏博士、同副所長鈴木紀雄博士、同五十嵐克哉博士、同福元敏之博士、同田上淳氏には、学位論文執筆の機会を与えて頂くとともに、多くの激励並びにご配慮を頂きました。ここに深く感謝致します。

鹿島建設（株）技術研究所の小池誠氏には、振動台実験の実施においてご協力頂きました。同永井和彦氏には積層ゴムの加力実験の実施についてご協力頂きました。鹿島建設（株）建築設計本部の上野薫氏には、設計者の視点から常に貴重なご助言を頂きました。同丸山東氏には免震建物の解析モデルをご提供頂きました。また、（株）ブリヂストンの芳沢利和氏、鈴木重信博士、菊地隆志氏には、本研究で用いた積層ゴムの試験体を支給して頂きました。各位に深く感謝の意を表します。

最後になりましたが、多くの関係者の方々、暖かい励ましを頂きました鹿島建設（株）技術研究所の多くの方々に御礼申し上げます。